



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.29.21.11-TDI

CARACTERIZAÇÃO DE CÁTODOS OCOS PARA PROPULSÃO IÔNICA

Jenny Carolina Robledo Asencio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato, aprovada em 04 de junho de 2014.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD2HTE>](http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD2HTE)

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.29.21.11-TDI

CARACTERIZAÇÃO DE CÁTODOS OCOS PARA PROPULSÃO IÔNICA

Jenny Carolina Robledo Asencio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelos Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato, aprovada em 04 de junho de 2014.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD2HTE>](http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GD2HTE)

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Asencio, Jenny Carolina Robledo.

As27c Caracterização de cátodos ocos para propulsão iônica / Jenny Carolina Robledo Asencio. – São José dos Campos : INPE, 2014. xxxii + 137 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.29.21.11-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Rodrigo Intini Marques, e Gilberto Marrega Sandonato.

1. Cátodos ocos. 2. Propulsores iônicos. 3. Sonda eletrostática. I. Título.

CDU 629.7.016.7



Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em

Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Combustão e Propulsão

Dr. Rodrigo Intini Marques


Presidente / Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Gilberto Marrega Sandonato


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Fernando de Souza Costa


Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Homero Santiago Maciel


Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

☒ unanimidade

Aluno (a): **Jenny Carolina Robledo Asencio**

São José dos Campos, 04 de Junho de 2014

*“A vigilância é o caminho da imortalidade; a negligência é o caminho da morte.
Os vigilantes não perecem; os negligentes já estão como mortos”.*

Buda Gautama

A minha família e amigos, grande inspiração e motivação da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Gilberto Marrega Sandonato pela sua colaboração, infinita paciência e companhia durante meu trabalho de mestrado. Ao laboratório de plasma do INPE por me permitir o desenvolvimento de meu trabalho nestas instalações, e aos colaboradores Ricardo Irita e José Américo Gonçalves.

Ao meu orientador Dr. Rodrigo Intini Marques pela sua colaboração, paciência e motivação no meu trabalho.

Ao INPE, ao Governo do Brasil e à CAPES por permitir a realização deste mestrado com bolsa de estudos, pois sem ela não teria condições de realizar este trabalho.

A minha mãe Rocio, a meu pai Javier, e meus irmãos Armando, Jessica e Carolina pela inspiração e força que dão na minha existência.

Ao Sergio meu grande amigo e amor, à sua mãe Consuelo e a sua família pelo apoio incondicional.

Aos meus grandes amigos os pintores e artistas, pela esperança e carinho que incondicionalmente me brindam à distância em especial ao Edwin Mojica e Mauricio Poveda.

Ao meu amigo Jhonathan Murcia pela motivação na minha vida profissional e pelo apoio incondicional.

A todos os meus colegas e amigos que conheci durante o mestrado em especial ao Jhonathan Aguirre, Roger Apaza, Lais Santos, Danielson Neves, Israel Borges, Saulo Gomez e Felipe Carreri, agradeço muito pela companhia, força e amizade.

À Queila Wakai pela amizade, paciência e colaboração nos assuntos administrativos.

Aos meus colegas, amigos e pessoas que todos os dias me fazem uma melhor pessoa.

RESUMO

Os catodos ocos são dispositivos que podem fornecer de forma eficiente alta densidade de corrente de elétrons, de modo que são componentes fundamentais para propulsores iônicos como principal fonte de elétrons para a geração de plasma na câmara de descarga e para neutralização do feixe de íons. O Laboratório Associado de Plasma (LAP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem desenvolvido catodos ocos desde o ano 2002, e estudos experimentais detalhados para caracterizar o seu desempenho não foram realizados até o momento. A presente dissertação apresenta um estudo experimental minucioso sobre a caracterização da descarga de catodos ocos equipados internamente com insertos de folha de tântalo e externamente com eletrodos de vigia envolventes. Foram testados três diferentes diâmetros de orifícios das ponteiros dos catodos e dos eletrodos de vigia envolventes. Foram identificados os modos de descarga (pluma, difusivo, pontual e transições) e foram medidos parâmetros de plasma (usando uma sonda de Langmuir cilíndrica simples) para diferentes condições operacionais, onde se variaram parâmetros tais como vazão mássica, tensão de descarga e corrente de descarga e usando argônio ou xenônio. Três diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga foram comutados, diodo com anodo, diodo com eletrodo de vigia e tríodo, dependendo da estabilidade da descarga de catodo. Os dados coletados pela sonda eletrostática foram pós-processados usando-se um algoritmo para estimar as densidades de elétrons e íons, potencial flutuante, potencial de plasma e temperatura de elétrons em diferentes posições axiais da sonda, a partir da superfície do eletrodo de vigia até perto do anodo. Os resultados obtidos neste trabalho, em termos de modos de descarga e parâmetros de plasma estão de acordo com os relatados na literatura e são considerados como os típicos para catodos ocos.

CHARACTERIZATION OF HOLLOW CATHODES FOR ION THRUSTERS

ABSTRACT

Hollow cathodes are devices that can provide, efficiently, high electron current densities, so that, they are primary components for ion thrusters as the main source of electrons for plasma generation in the discharge chamber, and for the ion beam neutralization, as well. The Associated Plasma Laboratory (LAP) at National Institute for Space Research (INPE) has been developing hollow cathodes since 2002, and no detailed experimental studies have been carried out to characterize their performance, so far. The present dissertation brings a detailed experimental study on the discharge characterization of hollow cathodes equipped internally with rolled tantalum foil inserts and externally with enclosed keepers. Three different orifice diameters on the tips of the cathodes and enclosed keepers were tested. Discharge modes (plume, diffuse, spot and transitions) were identified, as well as, the plasma parameters were measured (the latter using a single cylindrical Langmuir probe) under different operating parameters, such as the mass flow rate, discharge voltage and current, and using argon or xenon. Three different configurations of the electrical circuit carrying the discharge current were switched, namely, anode-diode, keeper-diode and triode, depending on the stability of the cathode discharge. The data collected by the electrostatic probe were post processed using a numerical algorithm, such that, densities of electrons and ions, plasma and floating potentials, and electron temperature could be all estimated for different axial locations of the probe, apart from the keeper tip up to distances near the anode. The results obtained in this work, in terms of discharge modes and plasma parameters, are in agreement to those reported in the literature and are considered as typical ones for hollow cathodes.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1- Desenho esquemático de um catodo oco e seus componentes.	3
Figura 1.2- Esquema dos circuitos elétricos de corrente de descarga: diodo com eletrodo de vigia (a), diodo com anodo (b) e tríodo (c).....	6
Figura 2.1- Ilustração de um propulsor iônico com seus componentes, princípio de funcionamento, esquema elétrico de descarga CC e gráfico do potencial ao longo do eixo longitudinal.	12
Figura 2.2- Esquema elétrico do catodo oco, eletrodo de vigia e anodo.	17
Figura 2.3- Tipos de orifício da ponteira do catodo oco: orifício cilíndrico (a), orifício convergente ou curvado (b) e orifício divergente (C).	18
Figura 2.4 - Tipos de catodo oco segundo inserto: inserto de folha de tântalo revestido e enrolado (a); tântalo tubular revestido (b); tungstênio poroso impregnado (c); inserto sem mistura de baixa função trabalho (d).....	20
Figura 2.5- Tipos de eletrodo de vigia: interno (a) externo (b), e envolvente (c).	22
Figura 2.6- Tipos de catodos ocos segundo as possíveis variações de material, configurações geométricas, inserto e tipo de eletrodo de vigia.	24
Figura 2.7- Tipos de catodo oco segundo configuração geométrica: tipo A (a), tipo B (b), tipo C (c).	26
Figura 2.8- Ilustração do processo de emissão termiônica.	28
Figura 2.9-Esquema dos processos que contribuem ao aquecimento interno, processos de dissipação da energia interna e fluxo de partículas do catodo oco.	32
Figura 2.10- Diagrama das regiões de plasma do catodo oco.	33
Figura 2.11- Característica V-I de uma descarga elétrica em corrente continua.	37
Figura 3.1- Desenho esquemático da montagem do experimento na porta da câmara de vácuo.	45

Figura 3.2- Desenho esquemático do sistema de alimentação de gás, sistema de bombeamento da câmara de vácuo e o sistema de bombeamento do espectrômetro de massa. (1) cilindro de gás, (2) regulador de pressão, (3) tubulação flexível, (4) válvula de agulha, (5) medidor de vazão mássica, (6) válvula de acionamento manual, (7) câmara de vácuo, (8) (10, 31) medidores de vácuo, (9, 32) unidades de controle dos medidores, com display digital, (11, 12, 24) válvulas de gaveta, (13, 14, 26) bombas tubo moleculares, (15,16 , 21, 25,27) linhas flexíveis, (17, 18, 19, 20) válvulas eletromagnéticas, (22) bomba Roots, (23, 28) bombas rotativas, (29) unidade analisadora de gás residual RGA, (30) computador.	47
Figura 3.3- (1) Câmara de vácuo, (2) parte do sistema de alimentação de gás, (3) sistema de bombeamento da câmara de vácuo.	49
Figura 3.4- (1) espectrômetro de massa e (2) sistema de bombeamento do espectrômetro de massa.	50
Figura 3.5- Esquema elétrico do experimento, onde: I_{Aq} é a corrente e V_{Aq} é a tensão de aquecimento, I_{Ev} é a corrente e V_{Ev} é a tensão do eletrodo de vigia, I_s é a corrente e V_s é a tensão da sonda, I_A é a corrente e V_A é a tensão do anodo.	51
Figura 3.6- Fotografia das fontes de tensão utilizadas no experimento.	52
Figura 3.7- Curva de sonda característica I-V e suas regiões: I é a região de saturação de íons, II é a região de transição e III é a região de saturação de elétrons.	53
Figura 3.8- Ilustração dos componentes da sonda de Langmuir simples.....	54
Figura 3.9- Gráfico do quadrado da corrente de íons em função da tensão de polarização da sonda (região de saturação de íons).....	55
Figura 3.10- Desenho da estrutura do catodo 7, corpo e aquecedor da Heat Wave Labs e eletrodo de vigia do LAP.	60
Figura 3.11- Desenho da estrutura dos catodos 10 e 5, corpos, aquecedores e eletrodos de vigia do LAP.....	60
Figura 3.12- Fotografia de exemplo de aquecimento do catodo 10.	64
Figura 3.13- Fotografia de exemplo de ignição do catodo 10.	65

Figura 3.14- Correção da curva característica I-V de sonda de Langmuir cilíndrica simples.	67
Figura 4.1- Ativação do catodo 5, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).	71
Figura 4.2- Ativação do catodo 7, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).	72
Figura 4.3- Ativação do catodo 10, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).	72
Figura 4.4- Reativação dos catodos: catodo 5 (a) e catodo 7 (b).	74
Figura 4.5- Exemplo da potência de aquecimento para ignição em função do tempo de aquecimento requerido para condicionamento dos catodos 5, 7 e 10, respectivamente.	75
Figura 4.6- Correntes de emissão máximas em função do tempo de aquecimento dos catodos 5, 7 e 10.	78
Figura 4.7 -Esquema dos modos de operação e seus parâmetros.	81
Figura 4.8- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas, com gás xenônio para o catodo 5, caso de vazões mássicas de 490 µg/s a 1,37 mg/s.	83
Figura 4.9- Curvas características V-I de descarga do catodo 5, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).	84
Figura 4.10- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas menores a 7 sccm, com gás xenônio para o catodo 7.	85
Figura 4.11- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 294 e 980 µg/s, com gás xenônio para o catodo 7.	86
Figura 4.12- Curvas características V-I de descarga do catodo 7, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a	

partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).....	87
Figura 4.13- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas menores que 441 $\mu\text{g/s}$, com gás xenônio para o catodo 10.....	88
Figura 4.14- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 588 e 882 $\mu\text{g/s}$, com gás xenônio para o catodo 10.....	89
Figura 4.15- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 1,17 e 1,76 mg/s , com gás xenônio para o catodo 10.....	89
Figura 4.16- Curvas características V-I de descarga do catodo 10, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).....	90
Figura 4.17- Exemplo de comparação da densidade de elétrons obtida pelos métodos: procedimento de Langmuir, método de ajuste exponencial e método de Druyvesteyn (a) e comparação do potencial de plasma obtido pelos métodos: procedimento de Langmuir e método de derivada (b), para testes realizados com argônio e xenônio no catodo 5.	93
Figura 4.18- Densidade de elétrons e íons em função da distância axial da sonda para testes com xenônio e com argônio, realizados com os catodos 5, 7 e 10.	94
Figura 4.19- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda para os testes com xenônio e com argônio, realizados nos catodos 5, 7 e 10 da Figura 4.18.	97
Figura 4.20- Potencial de plasma e potencial flutuante em função da distância axial da sonda para os testes com xenônio e com argônio, realizados nos catodos 5, 7 e 10 da Figura 4.18.....	97

Figura 5.1- Distribuição de densidade de elétron ao longo da distância obtida por sonda rápida nos estudos feitos por Martin e Williams (2009) (a) e estudo feito por Mikellides et al. (2005)(b).	107
Figura A.1- Esquema dos testes realizados ao catodo 5.	122
Figura A.2- Esquema dos testes realizados ao catodo 7.	123
Figura A.3- Esquema dos testes realizados ao catodo 10.	124
Figura B.1- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.	126
Figura B.2- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.	127
Figura B.3- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.	127
Figura B.4- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.	128
Figura B.5- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.	128
Figura B.6- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.	129
Figura B.7- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.	129
Figura B.8- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.	130
Figura B.9- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.	130
Figura B.10- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.	131
Figura B.11- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.	131
Figura B.12- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.	132

Figura B.13- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.....	132
Figura B.14- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.....	133
Figura B.15- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.....	133
Figura B.16- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.....	134
Figura B.17- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.....	134
Figura B.18- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.	135
Figura B.19- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.....	135
Figura B.20- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.....	136
Figura B.21- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.....	136

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 3.1- Relações geométricas dos catodos ocos testados, onde $AR1$ é a razões de área do orifício do inserto pela área do orifício da ponteira do catodo, $AR2$ é a razão de área do orifício da ponteira do catodo pela área do orifício da ponteira do eletrodo de vigia, dO_{ev} é o diâmetro do orifício da ponteira do eletrodo de vigia, e os diâmetros dos orifícios das ponteiras dos catodos correspondem a suas denominações como 0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm.	59
Tabela 4.1- Propriedades elétricas a 20°C dos filamentos aquecedores dos catodos 5, 7 e 10.....	76
Tabela 4.2- Valores médios de aquecimento para a condição de termalização (na temperatura máxima de aquecimento do filamento) dos catodos 5, 7 e 10.	77
Tabela 4.3- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 5.	79
Tabela 4.4- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 7.	79
Tabela 4.5- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 10.	79
Tabela 4.6- Valores máximos de densidade de elétrons e parâmetros de plasma para uma distância de 9 mm com respeito à superfície do eletrodo de vigia. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo.	96
Tabela 4.7- Valores máximos das densidades de elétrons e íons na distância de 9 mm com respeito à superfície do eletrodo de vigia, para catodos 5, 7 e 10 em modo pluma. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo. Os valores destacados em vermelho representam os de maior oscilação da temperatura de elétrons e do potencial de plasma ao longo da distância testada.	99

Tabela 4.8- Valores mínimos e máximos das temperaturas de elétrons e potencial de plasma, para catodos 5, 7 e 10 em modo pluma. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo. Os valores destacados em vermelho representam os de maior oscilação da temperatura de elétrons e do potencial de plasma ao longo da distância testada.	100
Tabela 5.1- Parâmetros operacionais típicos para os modos de descarga dos catodos 5, 7 e 10 para gás xenônio.	102
Tabela 5.2- Parâmetros de plasma para os modos observados nos experimentos com todos os catodos para argônio e xenônio.....	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AR	Aspect Ratio
FDEE	Função Distribuição de Energia de Elétrons
HRL	Hughes Research Laboratories
HWL	Heat Wave Labs
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITA	Instituto tecnológico aeronáutico
JPL	Jet propulsion Laboratory
LAP	Laboratório de Plasma
LCP	Laboratório de Combustão e Propulsão
LeRC	Lewis Research Center
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
OML	Orbital motion limited
PION	Propulsor Iônico
SERT	Space Electric Rocket Test
TMU	Tokyo Metropolitan University

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do material (m^2)
A_0	Constante de Richardson ($1,2 \times 10^6 \text{Am}^2\text{K}^2$)
A_{sda}	Área de coleta de cargas de sonda (m^2)
AR_1	Relação de área entre diâmetro do orifício do catodo e diâmetro interno do inserto (adimensional)
AR_2	Relação de área entre diâmetro do orifício do catodo e diâmetro do orifício do eléctrodo de vigia (adimensional)
α	Coeficiente de temperatura da resistividade ($^\circ\text{C}^{-1}$)
d_{o_pc}	Diâmetro do orifício central da ponteira (mm)
d_{o_pev}	Diâmetro do orifício da ponteira do eletrodo de vigia (mm)
e	Carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}\text{C}$)
E	Campo elétrico (N/C ou V/m)
E_s	Intensidade do campo elétrico (N/C ou V/m)
$\langle E \rangle$	Energia média dos elétrons (eV)
ε_0	Permissividade do vácuo ($8,9875 \times 10^{-12} \text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$)
$\epsilon (\lambda, T_{pl})$	Emissividade do plasma (adimensional)
$\epsilon (\lambda, T)$	Emissividade da superfície do inserto (adimensional)
F	Empuxo (N)
f_E	Função distribuição de energia dos elétrons
I	Corrente elétrica (A)
I_A	Corrente do anodo (A)
I_{Aqu}	Corrente de aquecimento (A)
I_D, I_d	Corrente de descarga (A)
I_{ev}	Corrente do eletrodo de vigia (A)
$I_{ev,ign}$	Corrente de ignição no eletrodo de vigia (A)
j	Densidade de corrente (A/m^2)
J_{cat}	Densidade de corrente no corpo do catodo oco (A/m^2)
J_e, J_{th}	Densidade de corrente de elétrons (A/m^2)

j_i	Densidade de corrente de íons (A/m ²)
k	Constante de Boltzmann (1,381x10 ⁻²³ m ² kgs ⁻² K ⁻¹)
l	Comprimento do material (mm)
l_{sda}	Comprimento da sonda cilíndrica (mm)
λ_D	Comprimento de Debye (μm)
M	Massa atômica (uma)
m_e	Massa dos elétrons (uma ou kg)
m_i	Massa dos íons (uma ou Kg)
\dot{m}	Vazão mássica de propelente (sccm ou Kg/s)
\dot{m}_{ign}	Vazão mássica de ignição (sccm ou kg/s)
N	Densidade de íons num dado ponto (cm ⁻³)
n_e	Densidade de corrente de elétrons (cm ⁻³)
n_i	Densidade de corrente de íons (cm ⁻³)
P_{Aqu}	Potencial de aquecimento (W)
P_D	Potência de descarga (W)
$P_{w,max}$	Potência máxima para aquecimento (W)
$P_{w,min}$	Potência mínima para aquecimento (W)
ρ	Resistividade elétrica do filamento aquecedor do catodo oco (Ω*m)
ρ_0	Resistividade (Ω*m)
φ	Potencial de queda através da bainha de plasma (V)
ϕ_p	Potencial de plasma (V)
q	Carga individual dos íons (C)
q_c	Perdida de calor devido à extração de elétrons (W/m ²)
q_i	Fluxo de calor do inserto (W/m ²)
q_j	Contribuição à entrada de energia térmica por aquecimento de Joule (W/m ²)
q_{NET}	Fluxo térmico líquido (W/m ²)
q_{pl}	Fluxo de calor de plasma (W/m ²)
q_s	Radiação de calor (W/m ²)

r_{sda}	Raio da sonda (mm)
R	Resistência elétrica (Ω)
T	Temperatura da superfície emissora ($^{\circ}\text{C}$)
T_e	Temperatura de elétrons (eV)
T_{pl}	Temperatura de plasma (eV)
t_{\max}	Tempo máximo de aquecimento (min)
t_{\min}	Tempo mínimo de aquecimento (min)
V	Potencial elétrico (V)
V_A	Tensão do anodo (V)
V_D, V_d	Tensão de descarga (V)
$V_{ev,ign}$	Tensão de ignição no eletrodo de vigia (V)
v_B	Velocidade de Bohm (m/s)
v_e	Velocidade de exaustão (m/s)
V_{ev}	Tensão do eletrodo de vigia (V)
v_i	Velocidade dos íons (m/s)
V_p	Potencial de plasma (V)
V_1	Potencial na grade extratora (V)
Φ_{ef}	Função trabalho efetiva (eV)
Φ_s	Função trabalho do material (eV)
x_2	Separação das grades (mm)
χ	Primeiro potencial de ionização (V)
κ	Condutividade térmica ($\text{W}/(\text{K}^{\circ}\text{m})$)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Conceitos básicos dos catodos ocos	2
1.2. Visão geral dos catodos testados e dos testes	4
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Plano de dissertação	7
2 REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. Propulsor iônico	10
2.2. Investigações teóricas e experimentais com catodos ocos	14
2.3. Catodo oco	17
2.3.1. Corpo e ponteira	17
2.3.2. Aquecedor	18
2.3.3. Inserto	19
2.3.3.1. Catodo com inserto de folha enrolada	20
2.3.3.2. Catodo com inserto tubular	21
2.3.3.3. Catodo com inserto impregnado	21
2.3.3.4. Catodo com inserto cilíndrico sem mistura a base de bário	22
2.3.4. Eletrodo secundário (eletrodo de vigia).....	22
2.4. Tipos de catodos.....	23
2.4.1. Configuração geométrica tipo A.....	26
2.4.2. Configuração geométrica tipo B.....	27
2.4.3. Configuração geométrica tipo C	27
2.5. Física dos catodos ocos.....	28
2.5.1. Mecanismos de emissão de elétrons.....	28
2.5.2. Mecanismos de Ignição e operação	30

2.5.3. Regiões de plasma do catodo oco.....	33
2.5.3.1.Região do inserto	34
2.5.3.2 Região do orifício	35
2.5.3.3.Região catodo-eletrodo de vigia.....	35
2.5.3.4.Região da pluma	36
2.6. Descargas elétricas em gases	36
2.7. Regimes de operação de descarga do catodo oco	39
2.7.1. Modo pluma.....	39
2.7.2. Modo difusivo	40
2.7.3. Modo pontual.....	40
2.7.4. Transição do modo pluma a pontual.....	41
2.8. Possíveis falhas e perdas nos catodos ocos	42
3 METODOLOGIA	45
3.1. Instalações.....	46
3.1.1. Câmara de vácuo, espectrômetro de massa e alimentação de gás.....	46
3.1.2. Fontes de tensão.....	50
3.1.3. Sonda de Langmuir simples	53
3.2. Catodos testados	58
3.3. Procedimentos	61
3.3.1. Preparação do catodo: ativação, reativação e condicionamento	61
3.3.1.1 Ativação	62
3.3.1.2 Reativação	62
3.3.1. Condicionamento	63
3.3.2. Ignição	64
3.4. Circuitos elétricos de corrente de descarga e regimes de operação de descarga	66
3.5. Medição	66
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	71

4.1. Resultados dos procedimentos	71
4.1.1. Ativação	71
4.1.2. Reativação	73
4.1.3. Condicionamento	75
4.1.4. Ignição.....	77
4.2. Modos de descarga	80
4.2.1. Resultados com xenônio	81
4.2.1.1. Catodo 5	82
4.2.1.2 Catodo 7.....	84
4.2.1.3 Catodo 10.....	87
4.2.2. Resultados com argônio	90
4.2.2.1. Catodo 5	90
4.2.2.2. Catodo 7	91
4.2.2.3. Catodo 10	91
4.3. Parâmetros de plasma	92
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
6 CONCLUSÕES	109
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE A – DIAGRAMAS DOS TESTES REALIZADOS	122
APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS PARÂMETROS DE PLASMA.....	126
B.1 Potencial flutuante	126
B.2 Potencial de plasma	128
B.3 Corrente de saturação de elétrons	129
B.4 Temperatura de elétrons	131
B.5 Densidade de elétrons.....	132

B.6 Densidade de íons.....	134
B.7 Comprimento debye	135

1 INTRODUÇÃO

Os catodos ocos começaram a ser utilizados a partir de 1930 como dispositivos para produção de plasma e íons (GOEBEL et al., 2005). Atualmente são várias as aplicações dos catodos ocos em dispositivos tais como tubos de micro-ondas, lasers e para processamento de materiais (MIKELLIDES et al., 2005). Há cinco décadas os catodos ocos são também utilizados em sistemas de propulsão elétrica e, especificamente, para um propulsor iônico é um componente primordial que influencia diretamente no seu desempenho. Em particular, para propulsores iônicos, os catodos ocos são utilizados para fornecer os elétrons necessários para a geração de plasma na câmara de descarga e para a neutralização do feixe iônico.

Os primeiros propulsores iônicos da América do Sul foram desenvolvidos no LAP/INPE a partir de 1985. A equipe do LAP, coordenada pelo Dr. Gilberto Marrega Sandonato, já testou uma série de cinco propulsores (PION 1-5). Pretende-se que os propulsores iônicos desenvolvidos pelo LAP/INPE sejam utilizados para o controle de atitude e de órbita de satélites em futuras missões espaciais. Também, testes experimentais e teóricos feitos no LAP permitiram a evolução de diferentes componentes dos propulsores iônicos, tais como sistemas de grades, sistemas de injeção de propelente, aquecedores para catodos ocos, sistema de confinamento magnético, entre outros. Concomitantemente foram desenvolvidos dispositivos de diagnóstico para medição de parâmetros do propulsor iônico e catodos ocos, bem como foram construídas máquinas para a confecção de componentes. Dentro deste contexto, os aportes na área de propulsão elétrica feitas pelo LAP/INPE e a grande experiência na área são fundamentais para a ciência e tecnologia espacial no Brasil e na América Latina.

O presente trabalho de mestrado objetiva contribuir para o aperfeiçoamento do desempenho dos propulsores iônicos do LAP/INPE por meio de um estudo experimental sobre catodos ocos.

1.1. Conceitos básicos dos catodos ocos

Os catodos ocos foram utilizados em propulsão elétrica como substitutos dos catodos de filamento de tungstênio (PARK, 1989). Esses últimos apresentavam muitas desvantagens em seu uso, primordialmente porque precisavam de alta energia térmica para emitir a densidade de corrente de elétrons requerida. Um resultado consequente do uso dos catodos de filamento foi o elevado consumo de potência elétrica e, portanto, uma redução no desempenho dos propulsores. Os filamentos também eram evaporados rapidamente devido à exposição ao plasma e ao feixe iônico, pela alta temperatura de operação e pela pulverização catódica do tungstênio por bombardeio de íons.

Em contraste, os catodos ocos são dispositivos mais robustos que os catodos de filamento de tungstênio. São mecanicamente simples, têm uma reignição confiável e com grande repetitividade mesmo após longos períodos de paralisação. Podem ser facilmente testados em terra e podem ainda ser expostos à atmosfera, operam a baixas e altas correntes de descarga de modo seguro e por longos períodos de tempo. Mais de 28000 horas de funcionamento já foram comprovadas teórica e experimentalmente (DOMOKOS, 1999).

Vale ressaltar que os catodos ocos também são dispositivos intrinsecamente complexos na sua operação, já que para uma dada aplicação, requerem testes detalhados de otimização paramétrica antes de uma operação segura e confiável (HAN, 1989). Apesar de serem estudados por mais de 40 anos, não existem modelos definitivos dos parâmetros de plasma capazes de descrever diferentes configurações e condições de descarga e neste aspecto os estudos estão limitados a testes variando-se os parâmetros geométricos, onde se observa a influencia destes parâmetros na vida útil e no desempenho dos catodos ocos (GOEBEL et al., 2005).

Em geral, um catodo oco é composto de um inserto metálico que usualmente é recoberto ou impregnado com componentes químicos a base de carbonatos para melhorar a capacidade de emissão e reduzir a energia requerida para

emissão; de um corpo feito com um tubo metálico, usualmente de tântalo, no qual é soldada, num extremo, uma ponteira de tungstênio de poucos milímetros de espessura e com um orifício central. Um aquecedor é localizado ao redor do corpo do catodo para fornecer a energia térmica inicial e um eletrodo de vigia envolvente auxilia na ignição e mantém a descarga do catodo. Todos os componentes do catodo estão ilustrados na Figura 1.1.

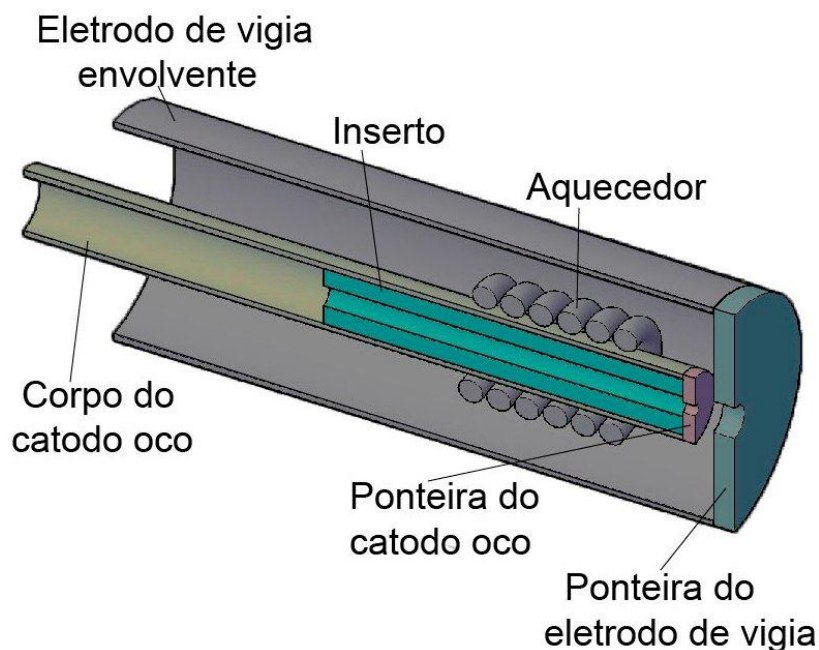


Figura 1.1- Desenho esquemático de um catodo oco e seus componentes.

Os processos físicos fundamentais que permitem a operação do catodo oco são a emissão termiônica e a emissão termiônica por efeito Schottky (SIEGFRIED; WILBUR, 1984). A emissão termiônica foi reportada pela primeira vez pelo físico e químico inglês Frederick Guthrie em 1873, e redescoberta pelo cientista e inventor norte americano Thomas Edison em 1880. É um processo físico onde um material sólido é aquecido a altas temperaturas, e os elétrons do material atingem uma energia suficiente para escapar da superfície (SEARS et al., 2005). A quantidade de energia mínima que deve ganhar um elétron para escapar de determinada superfície é chamada função trabalho. Quanto menor for essa função trabalho, menor energia será necessária para emissão termiônica. Por esta razão, muitos tipos de catodos ocos são construídos com insertos metálicos recobertos ou impregnados com componentes químicos a

base de bário e carbonatos. O objetivo dos carbonatos é diminuir a função trabalho do metal.

Por outro lado, a emissão termiônica por efeito Schottky, é o incremento da emissão termiônica do material emissor resultante de um campo elétrico intenso na superfície desse material e que aumenta a corrente de elétrons emitida (FORRESTER, 1988). O aumento na corrente de elétrons a uma dada temperatura resulta na redução da função trabalho efetiva. Tal mecanismo de emissão é o que permite ao catodo oco manter-se autossustentável depois que a ignição foi realizada, podendo ser desligado seu aquecedor. Na seção 2.4.1 serão discutidos outros mecanismos de emissão, responsáveis pela operação do catodo oco.

1.2. Visão geral dos catodos testados e dos testes

A variação de diferentes parâmetros geométricos, por exemplo, os diâmetros dos orifícios da ponteira do catodo e da ponteira do eletrodo de vigia, influenciam notavelmente as características de descarga e operacionais dos catodos ocos, sendo determinantes para um comportamento eficiente. Neste sentido, no presente estudo foi realizada a variação desses parâmetros procurando-se identificar as condições favoráveis de operação. Foram testados corpos de catodos ocos com orifícios de ponteira de 0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm de diâmetro. Para o primeiro corpo foram variados os orifícios das ponteiras dos eletrodos de vigia para 2 mm, 2,5 mm e 3 mm de diâmetro. Para os dois últimos corpos de catodos os orifícios das ponteiras dos eletrodos de vigia foram de 2,5 e 3 mm de diâmetro, respectivamente.

As características comuns em todos os catodos testados é que têm corpos de tântalo de 6,35 mm (1/4 polegada) de diâmetro externo e 55 mm de comprimento e foram equipados com ponteiras de tungstênio; as ponteiras dos eletrodos de vigia foram feitas de grafite; a distância para todos os catodos entre a ponteira do catodo e a ponteira do eletrodo de vigia foi de aproximadamente 0,6 mm. Para este estudo, os inserts foram feitos de folhas de tântalo recobertas com uma mistura de carbonatos (Ba, Sr e Ca), e

enroladas conformando um tubo de multicamadas com cerca de 5 mm de diâmetro externo e 2 mm de diâmetro interno. Este tipo de inserto é de construção simples, baixo custo e permite um grau variável de dopantes a serem utilizados, como aluminatos, carbonatos, entre outros (GONÇALVES et al., 1998).

Definidos os catodos, foram considerados alguns procedimentos antes de se iniciar em os testes dos regimes de operação de descarga e a realização de medidas dos parâmetros de plasma. Antes da ignição foram realizados três procedimentos chave para preparação dos catodos: ativação, reativação e condicionamento. Em geral, consistem de um aquecimento lento em um determinado intervalo de tempo. Na metodologia isto será descrito com mais detalhe (seção 3.3). Uma adequada preparação dos catodos foi de vital importância para os posteriores procedimentos de ignição.

Prosseguindo com a descrição do experimento, foram realizados testes de regimes de operação de descarga por meio da variação de parâmetros operacionais como vazão mássica de gás e corrente elétrica de descarga. Os testes se realizaram com argônio e xenônio. Os regimes de descarga atingidos em diferentes condições de operação foram: modo pluma, modo difusivo e modo pontual. Além desses regimes, transições entre os modos foram observadas.

Paralelamente aos testes de regimes, foram realizados também testes com três diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga sendo eles: diodo com eletrodo de vigia, diodo com anodo e tríodo. Os circuitos elétricos de corrente de descarga estão ilustrados na Figura 1.2: na Figura 1.2(a) a corrente de elétrons do catodo está sendo coletada pelo eletrodo de vigia, já que ele está polarizado positivamente com relação ao catodo neste caso, o circuito elétrico de corrente de descarga é conhecido como diodo com eletrodo de vigia; na Figura 1.2(b) a corrente de elétrons está sendo coletada pelo anodo que está polarizado positivamente com relação ao catodo. O circuito elétrico de corrente de descarga neste caso é de diodo com anodo; e finalmente, no caso que a corrente de elétrons está sendo coletada pelo eletrodo de vigia e pelo anodo,

porque ambos estão polarizados positivamente com relação ao catodo o circuito elétrico de corrente de descarga é conhecido como tríodo (Figura 1.2(c)). Os circuitos elétricos de corrente de descarga são dependentes dos valores da corrente de descarga, da tensão de descarga e da vazão mássica para que uma descarga seja mantida estável nos testes realizados com os catodos.

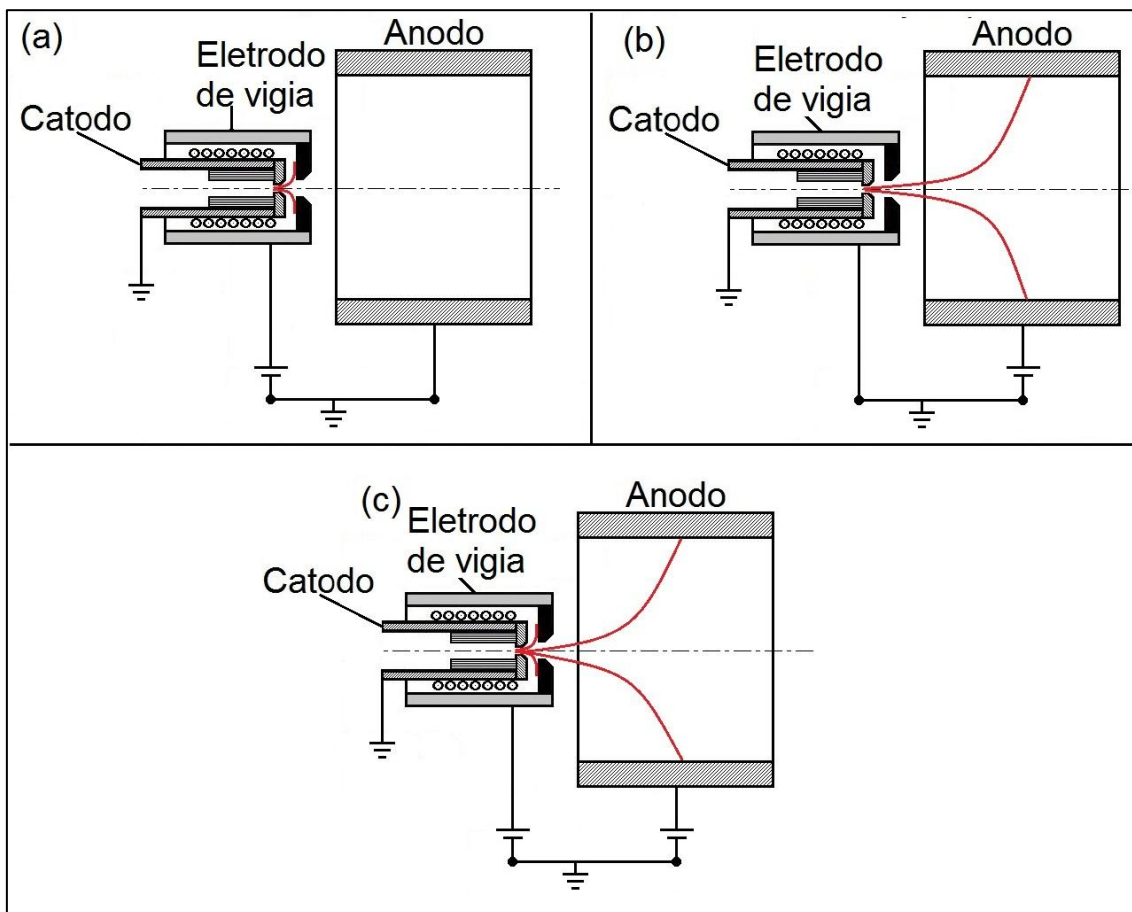


Figura 1.2- Esquema dos circuitos elétricos de corrente de descarga: diodo com eletrodo de vigia (a), diodo com anodo (b) e tríodo (c).

Finalmente, testes de medição dos parâmetros de plasma foram realizados nas condições mais estáveis dos regimes atingidos. Os dados foram coletados na região da pluma do catodo por meio de um sistema de sonda de Langmuir estimulada por uma fonte de tensão. Tal fonte foi controlada por um sistema de aquisição de dados e posteriormente os dados coletados eram pós-

processados pelo software de análise de dados. Os resultados destas análises serão discutidos no capítulo 5 do presente trabalho.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar por meios experimentais as propriedades da pluma de plasma dos catodos ocos, para aplicação em propulsores iônicos do LAP/INPE. No caso em estudo, foram realizados os procedimentos de preparação e ignição dos catodos e estabelecidas as características da pluma de plasma ao longo da distância entre o catodo e o anodo utilizando-se uma sonda de Langmuir, como mencionado na seção 1.2. A partir disso, foram obtidos os parâmetros de plasma e operacionais nos diferentes regimes de operação de descarga dos catodos testados. Foi analisada a influência da variação dos diâmetros dos orifícios das ponteiros dos catodos e dos eletrodos de vigia sobre os parâmetros de desempenho do catodo oco e em seus modos de operação. Finalmente, foi avaliado o desempenho do catodo oco utilizando inserto de folhas de tântalo enrolada e coberta com carbonatos.

1.4. Plano de dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. O primeiro traz uma breve introdução e a motivação para estudo, descrevendo alguns conceitos básicos relativos ao tema.

O segundo capítulo apresenta um resumo da teoria sobre o que é a propulsão iônica e a importância do catodo oco nos processos de operação do propulsor. Também, serão enfatizadas as investigações teóricas e experimentais feitas até hoje, a definição de catodos ocos, os principais componentes, os tipos de catodos ocos, a vida útil, os processos físicos, uma breve teoria sobre descargas elétricas, regimes de operação e possíveis falhas e perdas.

O terceiro capítulo contém uma descrição detalhada sobre a metodologia para o estudo experimental. São apresentadas as instalações experimentais, a instrumentação (câmara de vácuo, espectrômetro de massa, fontes de alimentação e sonda de Langmuir), os procedimentos prévios à medição de

parâmetros de plasma (ativação, reativação e condicionamento), o procedimento de variação de parâmetros operacionais e, finalmente, o procedimento de medição dos parâmetros de plasma.

O quarto capítulo compreende uma exposição dos resultados experimentais obtidos pelo método intrusivo de sonda eletrostática, envolvendo, também, as características dos modos de operação segundo a variação de parâmetros operacionais e a escolha dos melhores resultados dos regimes de operação.

No quinto capítulo são discutidos os resultados com base nos perfis das curvas de parâmetros de plasma, realizando-se a comparação com outros trabalhos experimentais.

O sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas neste trabalho.

No sétimo capítulo são dadas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, as figuras do apêndice A apresenta o resumo das condições operacionais dos testes realizados com os três catodos. O apêndice B mostra as figuras de todos os perfis dos parâmetros de plasma obtidos para os três catodos em diferentes regimes de operação de descarga e com xenônio e argônio. Tais curvas não estão incluídas no texto principal, pois nele estão ressaltadas as condições de operação mais favoráveis.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Hoje em dia, existe uma variedade de pesquisas na área da propulsão elétrica, uma vez que esta é uma tecnologia de alto impacto para aplicação em controle de altitude de órbitas de satélites e para uso em missões de espaço profundo. Trata-se de sistemas de propulsão a plasma, onde é possível atingir alto desempenho, mais que, por exemplo, sistemas de propulsão química convencional (GOEBEL; KATZ, 2008).

Fatores importantes na comparação dos sistemas propulsivos existentes são o impulso específico e a velocidade de exaustão (SUTTON; BIBLARZ, 2001; TURNER, 2005). O impulso específico é definido como a razão entre o empuxo e a taxa de consumo de propelente em peso e pode ser considerado como a eficiência de utilização de propelente de um propulsor. A velocidade de exaustão é a velocidade axial média equivalente, com a qual o propelente é ejetado do veículo. Os dois fatores mencionados são determinantes o desempenho de um propulsor e relacionam-se pela seguinte equação:

$$v_e = I_{sp}g_0 = \frac{F}{\dot{m}} \quad (2.1)$$

Onde v_e é a velocidade de exaustão, I_{sp} é o impulso específico, F é o empuxo e \dot{m} é a vazão mássica de propelente.

Para sistemas de propulsão elétrica, altas velocidades de exaustão podem ser atingidas, entre 5 e 300 km/s, com impulsos específicos também altos, entre 500 e 30.000 s. Em contraste, os propulsores químicos convencionais estão limitados a baixas velocidades de exaustão, entre 1,5 e 3 km/s, e baixo impulso específico entre 150 e 300 s. Vale acrescentar ainda, que os propulsores químicos convencionais são capazes de atingir alto empuxo, mas isso implica em um gasto elevado de propelente. Os propulsores químicos são mais utilizados em missões de lançamento e outras missões que requerem grandes empuxos.

Os propulsores elétricos estão atualmente limitados pelo baixo empuxo, estando na faixa de micro até um Newton. Mas, em um ambiente sem atrito como o espaço, e sendo um propulsor duradouro, podem-se gerar altas velocidades do veículo, após certo tempo de operação do propulsor. Uma outra possível limitação na atualidade, é que alguns tipos de propulsores elétricos podem requerer sistemas de alimentação elétrica e de propelente bem complexos.

Em virtude do que foi mencionado, entende-se que os sistemas de propulsão elétrica podem ter maior eficiência se houver energia disponível, que os sistemas de propulsão química. Já que o gasto de propelente nos propulsores elétricos é menor que nos propulsores químicos, são diminuídos os custos nas missões o que é muito importante em termos da viabilidade das missões. São diversas as missões que podem ser designadas pelas características de um propulsor, seja elétrico ou químico, para uma dada missão dependem do empuxo, impulso específico, tempo da missão, entre outros

Além do que já foi citado em um quadro breve e geral da propulsão elétrica, a partir deste ponto será dada ênfase ao motivo deste estudo, ou seja, catodos ocos para aplicação em propulsão iônica. Em primeiro lugar será definida a propulsão iônica e a função do catodo oco neste tipo de propulsor elétrico.

2.1. Propulsor iônico

O propulsor iônico é um dispositivo que utiliza forças eletrostáticas para produzir uma força de empuxo capaz de movimentar uma espaçonave. A propulsão é gerada pela ejeção de um plasma. Um gás neutro introduzido numa câmara de descarga é ionizado por bombardeio de elétrons provenientes de um catodo oco. Os íons positivos resultantes são, então, extraídos do plasma e acelerados ao exterior em direção oposta ao veículo. Isso é possível através de um campo elétrico criado por uma alta tensão aplicada em um sistema de grades. Prosseguindo, outro catodo localizado no exterior do propulsor neutraliza o feixe iônico por meio de uma corrente de elétrons. O objetivo é neutralizar a carga espacial dentro do feixe iônico e impedir que os

íons positivos sejam atraídos de volta à espaçonave, o que reduziria o empuxo líquido (CHOUEIRI, 2009). Uma ilustração de um propulsor iônico pode ser vista na Figura 2.1. Esta Figura também ilustra um gráfico da distribuição do potencial do propulsor, desde o seu interior ao exterior.

Na Figura 2.1 pode-se observar que os propulsores iônicos são compostos por uma câmara de descarga, na qual estão instalados um catodo principal, um anodo, alguns ímãs permanentes ou bobinas magnéticas, um sistema de duas ou mais grades e algumas vezes um defletor (ou baffle). O objetivo do defletor é distribuir o fluxo de corrente de elétrons e ao mesmo tempo reduzir a velocidade do gás neutro, aprimorando o processo de descarga dentro da câmara de descarga. Há de se ressaltar também que um catodo neutralizador é localizado na parte externa da câmara de descarga.

Na Figura 2.1, um gás neutro é injetado no interior do catodo oco, onde os elétrons produzidos pelos processos de emissão termiônica colidem com os átomos de gás neutro, criando um plasma. Os elétrons do plasma interno são extraídos para a câmara de descarga por um campo elétrico positivo, proveniente da polarização de um eletrodo externo (eletrodo de vigia). Em sequência, mais gás neutro é injetado dentro da câmara de descarga e ionizado pelos elétrons provenientes do catodo, surgindo um plasma dentro da câmara de descarga. Os elétrons emitidos pelo catodo oco principal (primários e termalizados ou secundários) são direcionados ao anodo por meio de linhas de campo magnético. Em seguida, a alta tensão aplicada nas grades atraem os íons e os aceleram a altas velocidades de exaustão. Os elétrons são mantidos dentro da câmara de descarga. Por fim, o feixe de íons extraído da câmara de descarga é neutralizado pelos elétrons provenientes do catodo neutralizador.

O campo magnético é criado dentro da câmara de descarga, pelo uso de ímãs permanentes ou bobinas magnéticas. Este campo magnético, também atua para controlar a área efetiva do anodo e para conter os elétrons de alta energia para ionização dentro da câmara de descarga (DOMOKOS, 1999).

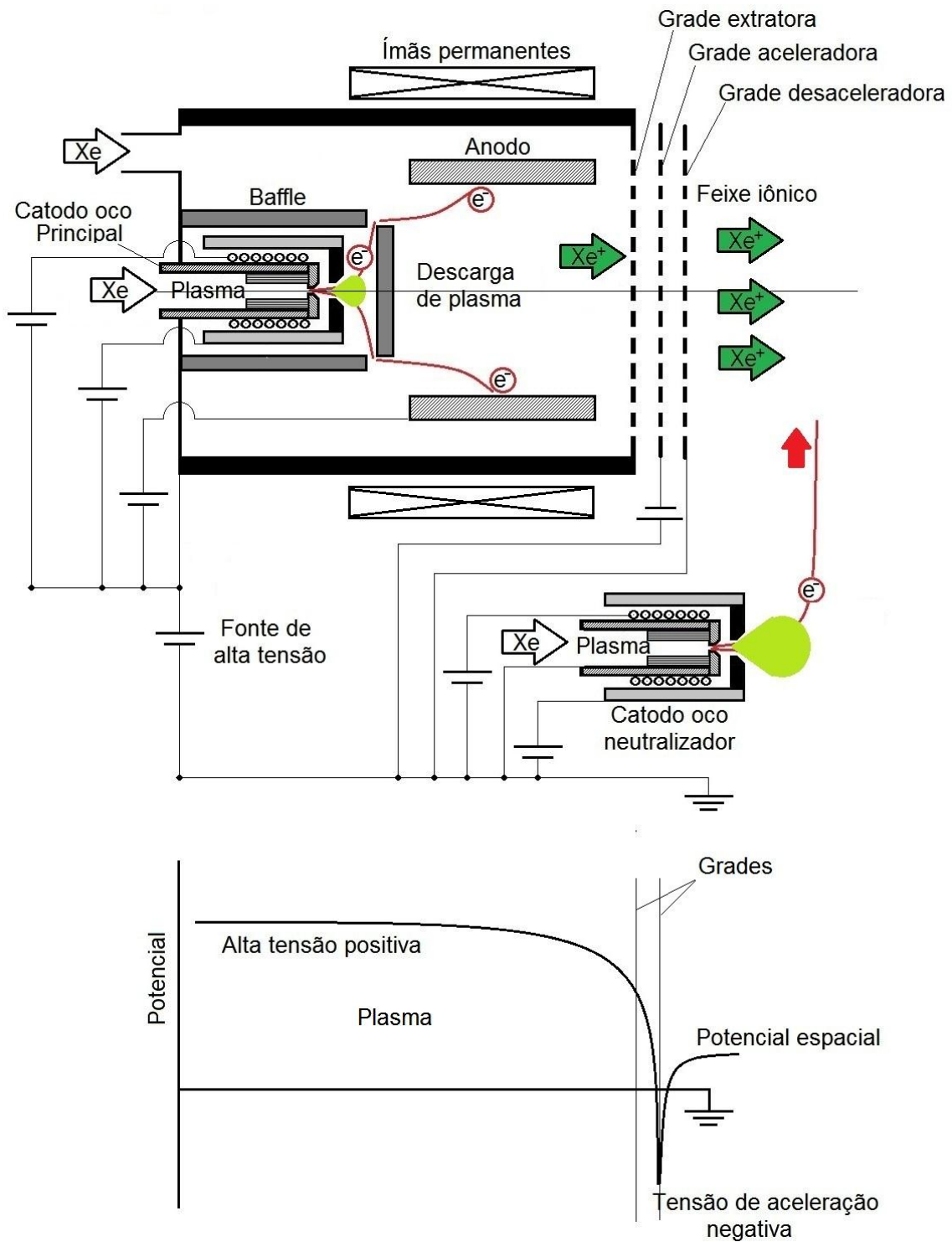


Figura 2.1- Ilustração de um propulsor iônico com seus componentes, princípio de funcionamento, esquema elétrico de descarga CC e gráfico do potencial ao longo do eixo longitudinal.
Fonte: Adaptada de Goebel e Katz (2008).

Por outro lado, na Figura 2.1, uma fonte de alta tensão é conectada entre as fontes do aquecedor do catodo, do eletrodo de vigia, do anodo e ao comum do

sistema. Por sua vez, as fontes do aquecedor do catodo neutralizador e do seu eletrodo de vigia são também conectados ao comum do sistema. Os íons positivos que são produzidos na câmara de descarga com alta tensão positiva, são acelerados para fora do propulsor pela grade aceleradora, já que esta é polarizada negativamente (GOEBEL; KATZ, 2008). A grade aceleradora é também conectada ao comum do sistema prevenindo, adicionalmente, que os elétrons que se movimentam no feixe de íons retornem ao propulsor, o que poderia perturbar a descarga principal do propulsor. Ao mesmo tempo, esta grade impede uma sobrecarga na fonte de alta tensão que pode ser produzida se a corrente de retorno de íons for elevada. A descarga do catodo oco principal é operada com uma corrente relativamente alta para aumentar a densidade de plasma dentro da câmara de descarga. O eletrodo de vigia do catodo neutralizador está sempre ligado. Os fluxos de elétrons, do catodo oco principal e do catodo oco neutralizador, são mantidos ao mínimo necessário para as condições de funcionamento do propulsor (DOMOKOS, 1999).

As perdas de íons para as paredes da câmara de descarga e o fluxo de gás neutro através das grades constituem a maior fonte de degradação de desempenho do propulsor (DOMOKOS, 1999). Além disso, os propulsores iônicos sofrem de uma deficiência, chamada limitação por carga espacial, que reduz severamente o empuxo. Enquanto os íons positivos passam entre as grades eletrostáticas do propulsor iônico, uma carga positiva se forma invariavelmente nessa região. Isso limita a corrente iônica que pode ser extraída para impulsionar a espaçonave (CHOUEIRI, 2009). A máxima densidade de corrente iônica j que pode ser mantida através de uma distancia d de aceleração unidimensional, através da qual é aplicada uma tensão V , é (LANGMUIR, 1923):

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9} \left(\frac{2q}{m_i} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{d^2} \quad (2.2)$$

Onde ε_0 é a permissividade do vácuo, q é a carga individual dos íons, m_i massa do íon e V potencial elétrico.

Então, a máxima densidade de empuxo de um feixe emitindo depende somente de V/d (GOEBEL & KATZ, 2008):

$$\frac{F}{A} = \frac{\dot{m}v_e}{A} = \frac{j m_i v_e}{q} = \frac{8}{9} \epsilon_0 \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (2.3)$$

Onde a velocidade de exaustão depende somente da relação carga-massa do íon, q/m_i , e a tensão, V (GOEBEL & KATZ, 2008):

$$v_e = \sqrt{\frac{2qV}{m_i}} \quad (2.4)$$

2.2. Investigações teóricas e experimentais com catodos ocos

Os primeiros trabalhos de investigação sobre catodos ocos, para aplicação em dispositivos de propulsão elétrica, foram realizados no ano 1960 (DOMOKOS, 1999). Tais trabalhos foram conduzidos pela NASA nos EUA, no centro de pesquisa Lewis – LeRC e no laboratório de pesquisa Hughes – HRL. Um trabalho de desenvolvimento inicial foi focado no catodo neutralizador para o teste do propulsor elétrico espacial SERT II.

As sondagens de catodos ocos são realizadas desde que foram inventadas por Lidsky et al. (1962).

Rawlin e Kerslake (1969) desenvolveram catodos com vida útil de mais de 1000 horas e começaram a investigar o uso de insertos de tungstênio impregnados com carbonatos e bário.

Vários esforços para modelar os processos de catodos ocos foram começados em 1970 por Sarver (1998) e Soulas (1994). Enquanto Fearn e Philip (1972) quantificaram vários dos parâmetros necessários para o desenvolvimento de tais modelos. Quantitativamente, obtiveram resultados sobre a física dos modos de descarga pontual e pluma.

Uma investigação realizada no laboratório de propulsão a jato – JPL da NASA, EUA, determinou em 1971 a distribuição de temperatura do corpo do catodo, experimental e analiticamente (GOLDSTEIN et al., 1971).

Mirtich (1973) relatou os resultados de uma investigação sobre a erosão da ponteira do catodo e, paralelamente, realizou o estudo das distribuições de temperaturas em catodos ocos para propulsores iônicos de 30 cm. No mesmo ano, Hudson e Weigand (1973) realizaram investigações sobre as características operacionais de um catodo oco usando um inserto impregnado. Foi visto que a operação do catodo com esses insertos são efetivamente idênticos à operação de catodos ocos com insertos de folhas de tântalo enrolados. Rawlin (1973), também fez testes de vida de um catodo oco operando com gás de mercúrio e comprovou 13000 horas de operação.

Rehn (1976) e Kaufman (1978), executaram algumas das primeiras investigações do uso de gases nobres com catodos ocos em 1976. O trabalho colaborativo foi uma tentativa para definir parâmetros que governavam a operação do catodo, independente da geometria e do propelente para os modos de operação de descarga pluma e pontual.

Uma das primeiras tentativas para um modelo exaustivo da descarga do catodo oco foi realizado por Ferreira e Delcroix (1978). Eles realizaram os primeiros estudos com gás inerte em catodos ocos. No ano 1978, também foi realizado um estudo por Siegfried e Wilbur (1978) com sondas eletrostáticas sobre catodos ocos utilizando gás de mercúrio. Nesse estudo, sondas eletrostáticas foram localizadas em diferentes posições na região do inserto e na região da pluma. Os catodos foram operados sem aplicação de um campo magnético axial e as sondas localizadas em diferentes posições permitiram estabelecer perfis da densidade, potencial e temperatura do plasma desses catodos.

As investigações com gás inerte para aplicação em alguns tipos de propulsores elétricos aumentaram (WILLIAMS; WILBUR, 1992; RAWLIN, 1982). Esse novo desenvolvimento criou a necessidade de dois novos aspectos para o modelamento de catodos ocos no início dos anos 1990. O primeiro para as

análises do acoplamento do plasma do catodo oco com o plasma da câmara de descarga de um propulsor. O segundo é um modelo de região do inserto do catodo oco para gases inertes. O primeiro modelo foi abordado no trabalho de Williams e Wilbur (1992). Salhi (1993) e Turchi (1994) tentaram resolver um modelo de orifício de catodo oco para propelentes de gases inertes. Mandell e Katz (1994) desenvolveram um modelo para a operação do catodo oco que está baseado principalmente no processo dentro do orifício.

Além dos esforços nos Estados Unidos, Reino Unido e França, mencionados anteriormente, trabalhos similares para o propulsor iônico Europeu RIT 10 e para contadores espaciais de plasma têm sido efetuados na Alemanha e Itália por Bianconi et al. (1991); Capacci et al. (1997); Cirri et al. (1993); Groh et al. (1976).

Domonkos (1999) elaborou um estudo sobre a avaliação de orifícios de catodos ocos de baixa corrente. O trabalho estava focado na redução do consumo de potência e de propelente. Os resultados dessa investigação experimental foram usados para validar um modelo de regiões de inserto e orifício de catodos ocos de baixa corrente.

Herman e Gallimore (2004) publicaram dados sobre o perfil de potencial da câmara de descarga de um tipo de propulsor NSTAR de 30 cm de seção de exaustão. Goebel et al. (2005), realizaram um estudo experimental detalhado sobre catodos ocos, utilizando sondas eletrostáticas em miniatura para caracterizar o perfil do plasma em todas as regiões do catodo. Além disso, elaboraram um modelo teórico em duas dimensões da região do inserto.

Martin e Williams (2009) realizaram um estudo com sonda eletrostática rápida, onde fizeram um mapeamento das estruturas de descarga de várias configurações de catodo e para obter um modelo sobre catodos ocos.

Portanto, verifica-se que desde 1960 foram feitas investigações sobre catodos ocos que tentam explicar de maneira teórica ou experimental o seu comportamento.

2.3. Catodo oco

Um esquema elétrico do catodo oco, eletrodo de vigia e anodo está ilustrado na Figura 2.2. No esquema, o eletrodo de vigia e o anodo são alimentados eletricamente por fontes de tensão polarizadas positivamente. Assim, os elétrons são atraídos por esses eletrodos na parte externa do catodo oco. Esta configuração elétrica é típica para uso em propulsores iônicos.

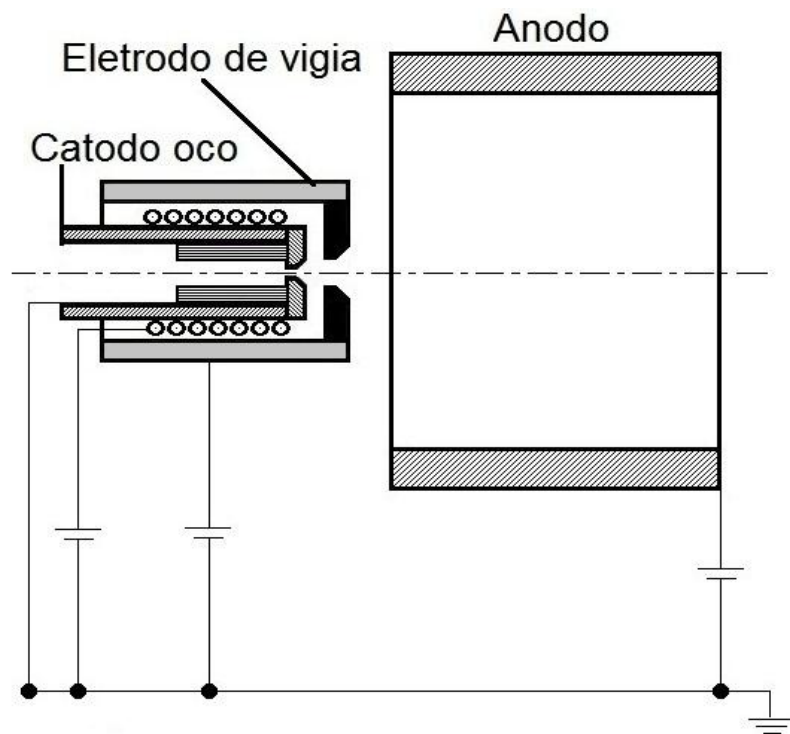


Figura 2.2- Esquema elétrico do catodo oco, eletrodo de vigia e anodo.
Fonte: Adaptado de Park (1989).

Na seção 1.1 foi dada uma breve introdução sobre os catodos ocos e seus componentes. Em complemento, nesta seção serão apresentados mais detalhes.

2.3.1. Corpo e ponteira

Os corpos dos catodos ocos são fabricados geralmente com tubos de tântalo de 3,2 a 12 mm de diâmetro, com paredes de espessura entre 0,2 e 0,5 mm. Numa extremidade do tubo é soldado um disco de aproximadamente 1 mm de espessura com mesmo diâmetro do tubo e este é conhecido como ponteira. A

ponteira é usualmente de tungstênio e tem um orifício no centro que pode ser de alguns poucos décimos de milímetros de diâmetro. Em determinadas ocasiões, o tubo e a ponteira são feitos de molibdênio simplificando-se a fabricação de formas especiais.

O propósito da ponteira do catodo é aumentar a probabilidade de ionização dentro do catodo oco por aumento da densidade de gás neutro no interior do catodo (SIEGFRIED; WILBUR, 1983). O pequeno orifício da ponteira do catodo mantém a alta densidade de gás neutro dentro do catodo, restringindo o fluxo de propelente e, também, fornecendo um caminho para a descarga a jusante do catodo.

Existem três configurações de orifício típicas: orifício cilíndrico, orifício divergente e orifício convergente ou curvado, como mostra a Figura 2.3.

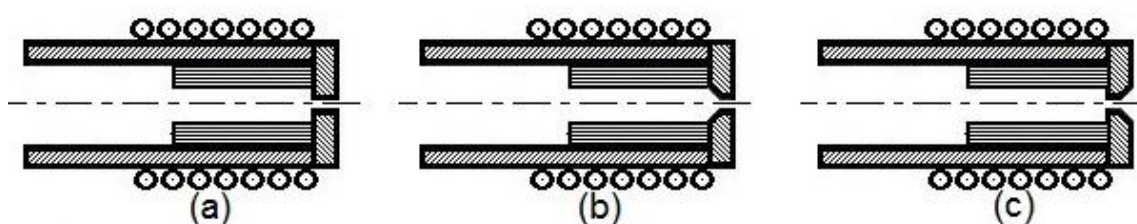


Figura 2.3- Tipos de orifício da ponteira do catodo oco: orifício cilíndrico (a), orifício convergente ou curvado (b) e orifício divergente (C).

Fonte: Adaptado de Park (1989).

Os primeiros experimentos com catodos ocos realizados por Park (1989) mostraram que as características de descarga de catodos ocos com orifício curvado são melhores que as características para um orifício cilíndrico nas mesmas condições. Neste caso o catodo pode existir melhor penetração do campo elétrico através do orifício, quer dizer transporte de gás/ion através do orifício.

2.3.2. Aquecedor

Um aquecedor para catodo oco é bem simples, consiste de um filamento encapsulado num material cerâmico, que é enrolado ao redor do corpo do catodo. O filamento, geralmente tem um diâmetro de 0,2 mm de tungstênio

puro, mas, algumas vezes é utilizado tungstênio com 3% de rênio (PARK, 1989).

Existem catodos ocos que podem ser desenhados sem aquecedor. Estes catodos precisam primordialmente de um eletrodo de vigia que pode ser envolvente ou exterior, os quais serão descritos em detalhes na seção 2.3.4. Os catodos ocos sem aquecedor utilizam a lei de Paschen, ou seja, operam por ruptura dielétrica do gás sem o suporte de emissão termiônica. Eles são relativamente simples e robustos, consomem baixa potência de operação e têm uma alta vida útil. A desvantagem é que precisam de alto potencial de ativação (PARK, 1989).

2.3.3. Inserto

O inserto de um catodo oco é feito de metal, tipicamente tântalo ou tungstênio. Como a função trabalho dos metais é alta é necessária alta energia térmica para emitir uma corrente de elétrons adequada para ignição (ver seção 1.1). Uma solução para reduzir a função trabalho do metal é revestir ou impregnar determinados componentes químicos tais como: misturas de carbonatos e aluminatos a base de bário. O propósito de tal mistura é melhorar a capacidade de emissão termiônica do metal. Neste sentido, são quatro os métodos que podem ser realizados para aplicar uma mistura de baixa função trabalho ao inserto do catodo (PARK, 1989): revestindo a parede interna do corpo do catodo; revestindo uma tira fina de folha de tântalo, que é enrolada numa espiral num mandril antes de ser inserida no corpo do catodo; revestindo a superfície interna e externa de um inserto de metal cilíndrico; ou impregnando um inserto metálico poroso. Na Figura 2.4 estão ilustrados os tipos de catodos ocos segundo os tipos de insertos e serão descritos nas seguintes subseções.

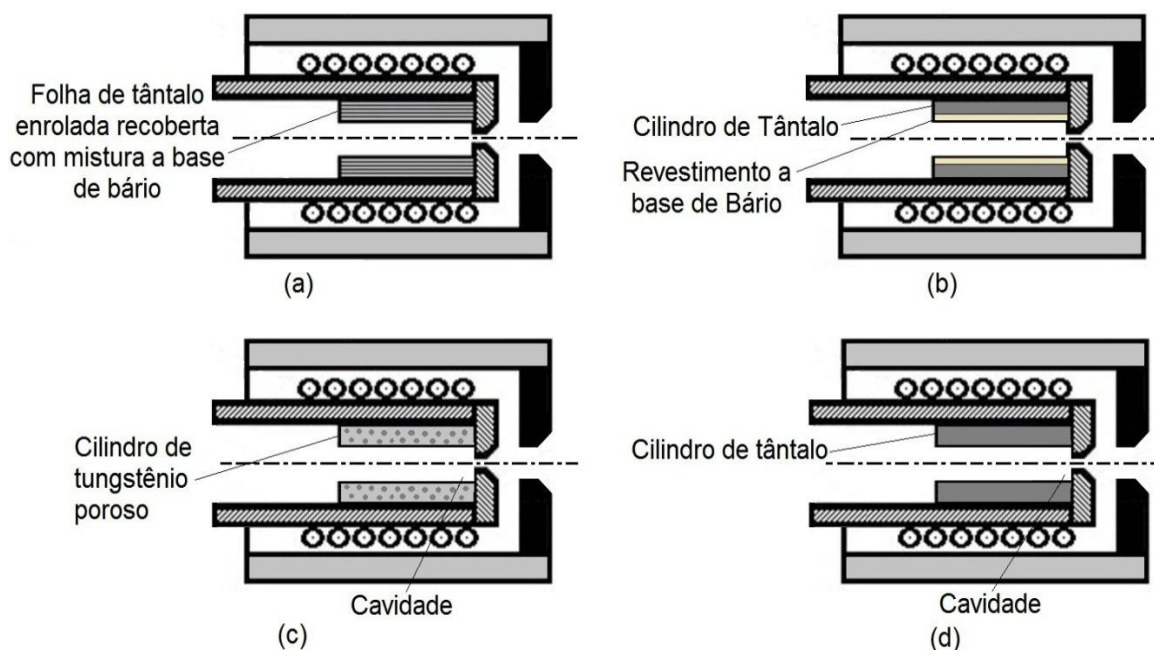


Figura 2.4 - Tipos de catodo oco segundo inserto: inserto de folha de tântalo revestido e enrolado (a); tântalo tubular revestido (b); tungstênio poroso impregnado (c); inserto sem mistura de baixa função trabalho (d).
Fonte: Adaptado do Park (1989).

2.3.3.1. Catodo com inserto de folha enrolada

O inserto de folha de tântalo enrolada (Figura 2.4(a)) é confeccionado utilizando uma folha de tântalo revestida por uma mistura de carbonatos (Ba, Sr e Ca). A folha é enrolada com um mandril conformando um tubo de multicamadas.

A vantagem de utilizar insertos de tipo de folha de tântalo enrolada no catodo oco é que a descarga de ignição pode ocorrer com baixas temperaturas de aquecimento, menores que 850°C (PARK, 1989). Esse método de fabricação dos insertos é mais simples que, por exemplo, o método de fabricação de insertos impregnados.

Uma desvantagem dos insertos de tipo de folhas de tântalo enrolada é que são suscetíveis a danos por vibrações. Uma vez que são expostos ao ar depois de ser operados podem absorver facilmente água, já que o material revestido é hidrófilo (usualmente todos os catodos ocos com um material emissor revestido ou impregnado têm essa desvantagem).

2.3.3.2. Catodo com inserto tubular

O inserto tubular (Figura 2.4(b)) é fabricado revestindo a superfície interna do inserto de metal cilíndrico com uma quantidade controlada de carbonatos. A ignição neste tipo de inserto é possível com temperaturas de aquecimento superiores aos 900°C (PARK, 1989).

2.3.3.3. Catodo com inserto impregnado

Um inserto impregnado (Figura 2.4(c)) é geralmente composto de uma mistura de 4:1:1 de $\text{BaO}:\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$, onde a relação representa o coeficiente estequiométrico dos óxidos de metais terrosos (alcalinos). Para promover a impregnação, o catodo deve ser aquecido em aproximadamente 1000°C, reagindo com a matriz de tungstênio e produzindo gases de bário (POTTINGER, 2005). O bário se espalha sobre a superfície de tungstênio poroso formando uma monocamada. Tal monocamada está fortemente ligada à superfície de tungstênio por uma monocamada subjacente de oxigênio, resultando na redução da função trabalho do material (FALCE, 1979). Esta diminuição da função trabalho facilita a emissão termiônica de elétrons.

A química de catodos ocos impregnados é criticamente importante para a operação de componentes em termos da emissão de elétrons e vida útil. A difusão de material impregnante, ao longo dos poros do inserto de tungstênio, não só repõe a monocamada de bário, mas também pode causar bloqueios dos poros que inibem a produção adicional de bário. O material impregnante, deve também reagir com impurezas contaminantes, tais como BaWO_4 e Ba_2CaWO_6 , que envenenam a superfície do inserto. Estas impurezas causam o aumento da função trabalho no material por deslocamento do bário sobre a monocamada. A operação do catodo oco em altas temperaturas causa a evaporação do bário e perdas através do orifício. Estes fatores resultam na diminuição da emissão. Por estas razões, a estabilidade de emissão de elétrons em função do tempo, temperatura de operação e esgotamento do bário, são continuamente estudadas na tentativa de entender os mecanismos

de perda do bário, aumentando assim o tempo de vida e o desempenho do catodo oco (POTTINGER, 2005).

2.3.3.4. Catodo com inserto cilíndrico sem mistura a base de bário

O inserto cilíndrico sem mistura a base de bário (Figura 2.4(d)) têm um desempenho diferente dos insertos mencionados anteriormente. Esse tipo de inserto requer altas temperaturas na ponteira do catodo para operar normalmente, usualmente 200°C mais elevadas que com um catodo com material de baixa função trabalho. Alta vazão mássica é necessária como padrão para permitir que o catodo sem material emissor seja ativado e as temperaturas devem ser mantidas dentro da capacidade de seu aquecedor (PARK, 1989).

2.3.4. Eletrodo secundário (eletrodo de vigia)

O eletrodo secundário, também chamado eletrodo de vigia (keeper em inglês), é utilizado para manter a estabilidade na descarga na eventualidade de flutuações nas condições de descarga da câmara e ajudar no processo de ignição do catodo. Os primeiros estudos com catodo oco incluíram o uso de eletrodos de vigia internos como mostrado na Figura 2.5(a) (PARK, 1989). Atualmente, os eletrodos de vigia internos são utilizados como sondas em testes para diagnóstico dos parâmetros de plasma no interior do catodo.

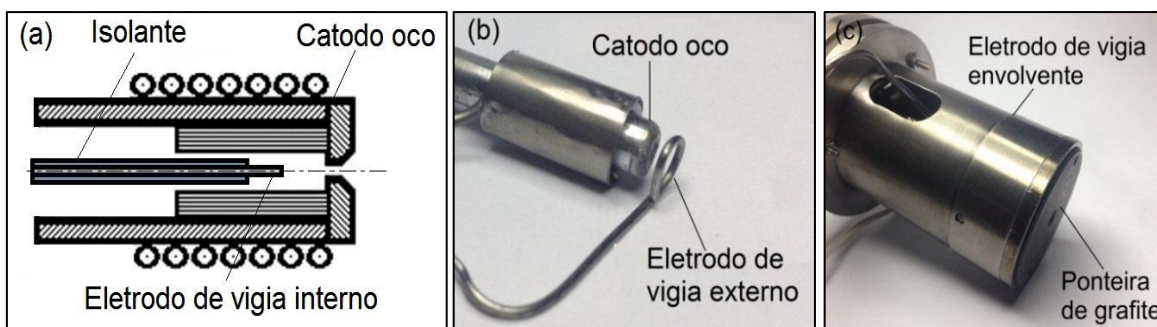


Figura 2.5- Tipos de eletrodo de vigia: interno (a) externo (b), e envolvente (c).

Existem dois tipos adicionais de eletrodos de vigia: o externo (Figura 2.5(b)) e o envolvente (Figura 2.5(c)). O eletrodo de vigia envolvente é totalmente acoplado ao catodo e é fabricado com um tubo cilíndrico usualmente de aço

inox. Uma ponteira de grafite é localizada num dos extremos do tubo cilíndrico, e têm um orifício central de uns poucos milímetros de diâmetro. Hoje em dia, são varias a teorias que propõem que o eletrodo de vigia pode influenciar no processo de regimes de descarga do catodo oco.

2.4. Tipos de catodos

Na seção 2.3 foi feita uma descrição detalhada sobre os componentes dos catodos ocos. Concomitantemente, foram apresentados alguns tipos de catodos ocos segundo alguns desses componentes. Como a operação de um catodo oco é dependente de muitos fatores tais como, dimensionamento de componentes, formas geométricas de orifícios, tipos de inserto, materiais e configurações geométricas, no esquema da Figura 2.6 estão resumidos alguns dos tipos de catodos ocos existentes. Em complemento, esta seção apresentará os tipos de catodos ocos segundo a configuração geométrica.

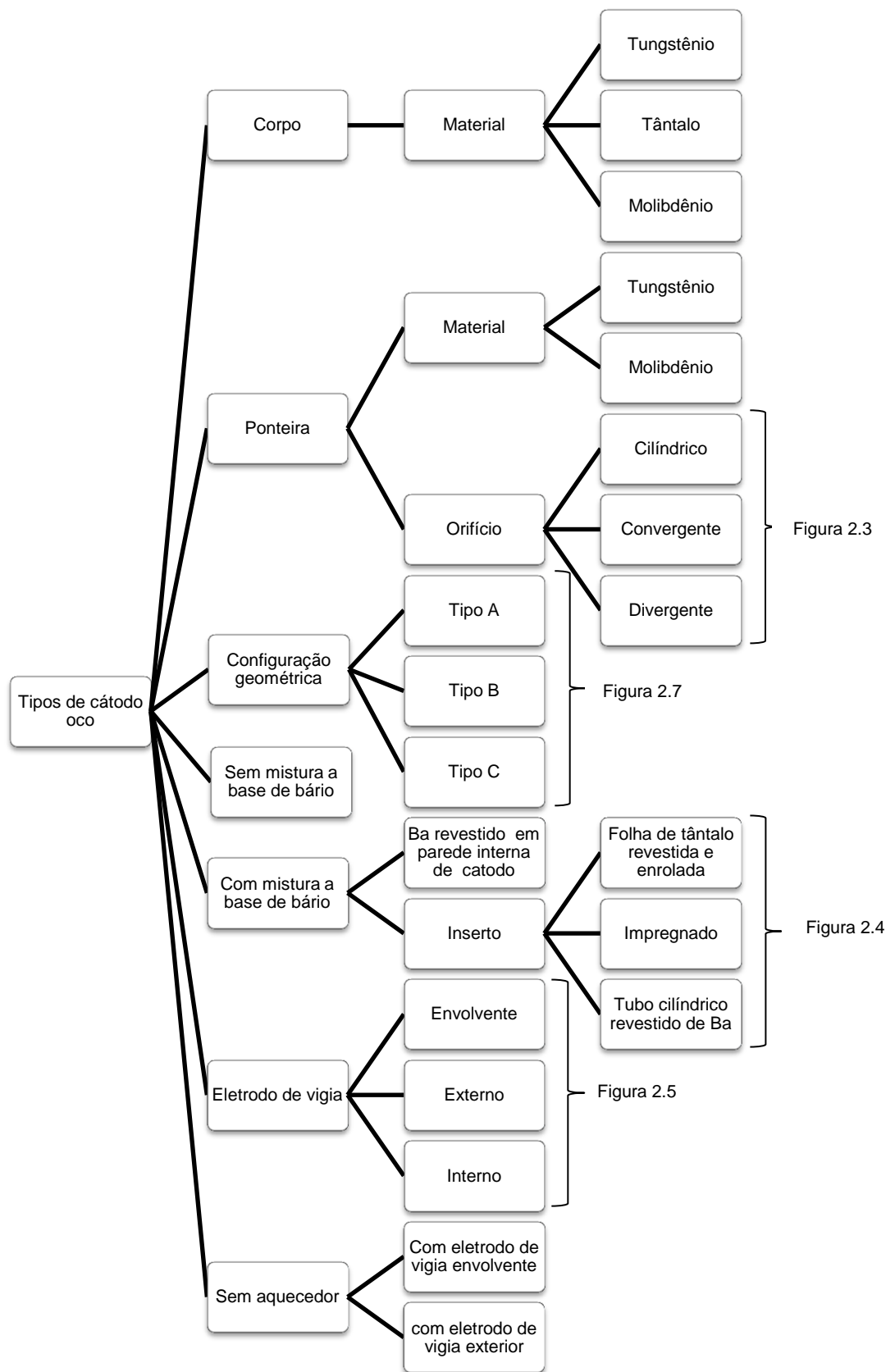


Figura 2.6- Tipos de catodos ocos segundo as possíveis variações de material, configurações geométricas, inserto e tipo de eletrodo de vigia.

Nos catodos ocos, a geometria e dimensões dependem da quantidade de corrente requerida para a emissão (GOEBEL; KATZ, 2008). Deste modo, os catodos ocos utilizados para descarga principal de um propulsor iônico têm características diferentes aos catodos utilizados para neutralização. Particularmente, os catodos ocos utilizados para neutralização devem emitir uma corrente de elétrons igual à corrente do feixe iônico. Estes catodos são de menor tamanho que os catodos principais, devem ser projetados para serem autossustentáveis (ou seja, operam após de ligados sem aplicação de uma temperatura já que se mantem aquecidos pelos mesmos processos de emissão termiônica), operando de forma confiável e com baixas correntes.

Por outro lado, para altas descargas de corrente requerem-se catodos com insertos de tamanho grande, de tal forma que a corrente de elétrons emitida seja suficiente para manter a descarga. Então, as condições de descarga para uma dada aplicação de catodo oco podem ser determinantes para definir o diâmetro interno do inserto.

Um dos parâmetros chave nos catodos ocos é o diâmetro do orifício da ponteira do catodo (GOEBEL; KATZ, 2008). Por exemplo, para catodos neutralizadores os diâmetros devem ser menores ou iguais a 0,3 mm. Para catodos principais os diâmetros não devem ser menores de 1 mm e para altas descargas de corrente devem ser maiores que 3 mm. Além disso, no caso de propulsores iônicos grandes, os catodos ocos devem ter orifícios ainda maiores e algumas vezes devem ser confeccionados com a ausência deles. Neste caso, o inserto é localizado dentro do tubo do catodo e exposto à descarga de plasma da câmara do propulsor. É bom acrescentar, ainda, que os diâmetros dos orifícios são determinantes no comportamento interno do catodo (GOEBEL; KATZ, 2008). A razão é que o valor da pressão do gás neutro dentro do catodo afeta a densidade de plasma, bem como o perfil de plasma devido aos efeitos de colisionais.

Em síntese, existem três tipos de catodos ocos segundo a configuração geométrica: A, B e C. Essas configurações são definidas pela relação de área do diâmetro interno do inserto pelo diâmetro do orifício da ponteira do catodo,

ou seja, $AR_1 = d_{o_i}^2/d_{o_{pc}}^2$. Na Figura 2.7, estão ilustrados os tipos de configurações geométricas e os parâmetros utilizados para calcular tal relação.

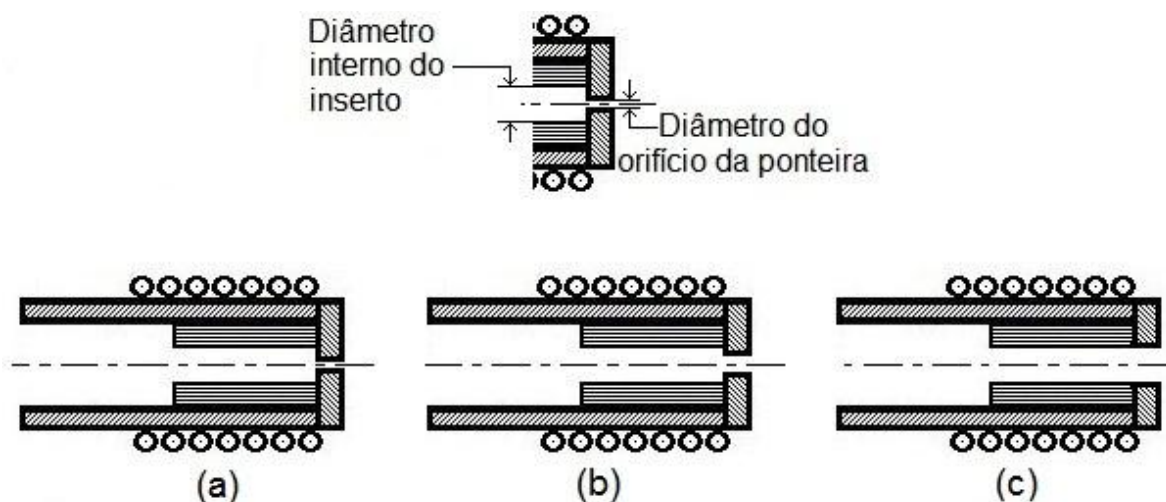


Figura 2.7- Tipos de catodo oco segundo configuração geométrica: tipo A (a), tipo B (b), tipo C (c).

Fonte: Adaptado do Goebel e Katz (2008).

2.4.1. Configuração geométrica tipo A

Na configuração geométrica tipo A (Figura 2.7(a)), a relação AR_1 tem um valor alto. Nesta condição, o catodo oco opera tipicamente com baixa corrente e altas pressões internas de gás. Como resultado, é produzida alta densidade de plasma, mas está restringida a uma extensão de plasma de uns poucos milímetros a jusante do orifício. Dentro do catodo, o plasma se concentra na região do inserto, resultando em maior aproveitamento da superfície do inserto para emissão de elétrons. Também, o catodo é aquecido após ignição (quando o catodo esta em regime autossustentável e com o aquecedor desligado) primordialmente por concentração de energia térmica no orifício. Os catodos de configuração geométrica tipo A são usualmente utilizados como neutralizadores (GOEBEL; KATZ, 2008).

Resumidamente, a física para catodos com configuração geométrica tipo A é a mesma que para uma coluna de plasma clássica positiva. Os fatores fundamentais, neste caso, são o campo elétrico axial no plasma com colisões que conduzem a corrente e o plasma de aquecimento resistivo. Uma grande

fração da potência ôhmica (potência dissipada) do plasma depositado no orifício entra aquecendo a ponteira por bombardeio de íons, a qual contribui ao aquecimento do inserto por condução e radiação (GOEBEL; KATZ, 2008).

2.4.2. Configuração geométrica tipo B

Na configuração geométrica tipo B (Figura 2.7(b)) a relação AR_1 é menor que no caso do tipo A. Com orifícios de maior diâmetro que os de tipo A, mas menores que os de tipo B, o catodo opera com baixa pressão interna de gás. Também, o mecanismo de aquecimento após a ignição é devido ao bombardeio de elétrons e íons na superfície do inserto bem como à combinação dos dois, dependendo do tamanho do orifício e das condições de operação (GOEBEL; KATZ, 2008). Além disso, como o diâmetro do orifício é consideravelmente grande existe pouco aquecimento resistivo. O plasma na região do inserto é gerado por ionização do gás neutro e pela descarga de corrente fluindo através da região do inserto dentro do orifício.

2.4.3. Configuração geométrica tipo C

A configuração geométrica tipo C (Figura 2.7(c)) é uma configuração típica para catodos de alta corrente, usualmente, o orifício tem um diâmetro grande ou é inexistente. Nesta configuração, apresentam-se grandes gradientes de densidade de átomos neutros na região do inserto. A pressão interna desse tipo de configuração é menor em comparação aos outros tipos e o mecanismo de aquecimento após da ignição é normalmente por bombardeio de íons dentro do inserto (GOEBEL; KATZ, 2008).

O plasma na região do inserto é dominado por colisões, enquanto, a região catodo-pluma externa de plasma é quase sem colisões. Isso cria uma alta densidade que se estende ao longo do feixe longitudinal e os gradientes de potencial podem expor parte da região à jusante do inserto a potenciais mais elevados. Em consequência, é aumentado o bombardeamento de íons.

2.5. Física dos catodos ocos

2.5.1. Mecanismos de emissão de elétrons

Os principais mecanismos de emissão do catodo oco são a emissão termiônica e a emissão termiônica por efeito Schottky (SIEGFRIED; WILBUR, 1983). Por um lado, a emissão termiônica é resultante do aquecimento do catodo a uma dada temperatura. O aquecimento do material emissor (inserto) aumenta a densidade de corrente de elétrons perto da sua superfície, como se mostra na Figura 2.8. Neste processo, a função trabalho e a temperatura do material emissor são os principais parâmetros determinantes para aumento da densidade de corrente de elétrons.

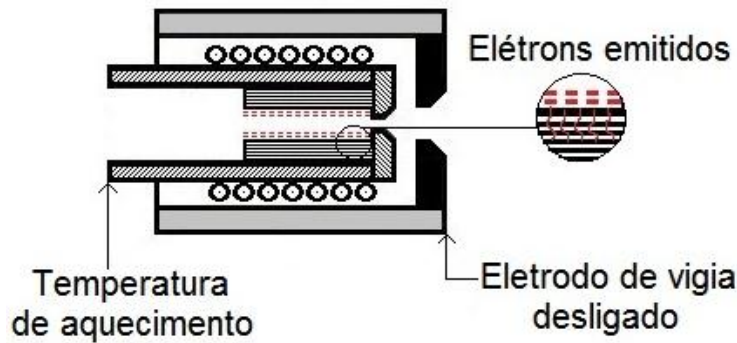


Figura 2.8- Ilustração do processo de emissão termiônica.

A densidade de corrente de elétrons, para uma superfície emitindo termiônicaamente é descrita pela equação de Richardson-Dushman (DUSHMAN, 1923):

$$J_{th} = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_s}{kT}\right) \quad (2.5)$$

Onde J_{th} é a densidade de corrente de elétrons, A_0 é a constante de Richardson, T é a temperatura da superfície emissora, ϕ_s é a função trabalho do material, e é a carga do elétron e k é a constante de Boltzmann.

Por outro lado, a emissão termiônica por efeito Schottky é um fenômeno que surge na presença de um campo elétrico intenso, adjacente à uma superfície emitindo termiônicaamente. O campo elétrico intenso é criado por um plasma

denso formado dentro do catodo. Esse efeito reduz a função trabalho do material emissor. Por conseguinte, a função trabalho efetiva média da superfície emissora ϕ_{ef} , será:

$$\phi_{ef} = \phi_s - \left(\frac{e|E|}{4\pi\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Onde E é o campo elétrico.

Para o processo de emissão termiônica por efeito Schottky, a densidade de corrente de elétrons é dada pela equação de Schottky. Essa equação obtém-se simplesmente substituindo ϕ_s por ϕ_{ef} na equação 2.5.

Outros mecanismos de emissão são também responsáveis pela operação de um catodo oco. Um deles ocorre quando gerado um campo elétrico muito mais intenso que na emissão termiônica por efeito Schottky e é chamado emissão por campo. Em tal, os elétrons são extraídos da superfície em baixa temperatura só pela ação de campo elétrico. Essa forma pura de emissão de campo é também conhecida como catodo frio ou emissão auto-eletrônica. Para tal mecanismo foi desenvolvida uma expressão baseada na teoria da mecânica ondulatória (FOWLER; NORDHEIM, 1928):

$$j_e = 1,54 \times 10^{-6} \frac{E^2}{\phi_s} \exp \left(-6,8 \times 10^9 \frac{\phi_s^{3/2}}{E} \right) \quad (2.7)$$

Onde j_e é a densidade de elétrons.

Finalmente, processos alternativos referidos frequentemente como mecanismos secundários de emissão podem aumentar ainda mais a emissão de elétrons. Os elétrons podem ser libertados da superfície do inserto por impacto de íons ou espécies metaestáveis. A ionização do volume de plasma também contribui à emissão total. A radiação eletromagnética radial incidente na superfície do inserto pode proporcionar que os elétrons sejam também liberados (isso é conhecido como efeito fotoelétrico), mas a contribuição dos fotoelétrons à corrente de emissão total é desprezível. A emissão secundária

de elétrons contribui com menos do que o 5% na corrente total de elétrons, para catodos ocos operando com gás de mercúrio, e menos que 1% para catodos ocos operando com xenônio (RUDWAN, 2003; SIEGFRIED; WILBUR, 1984).

A emissão de elétrons não é uniforme ao longo do comprimento do catodo oco. Existem gradientes de plasma e de temperatura na direção axial que influenciam na liberação de elétrons em um dado ponto. A zona responsável pela maioria da densidade de corrente de elétrons é chamada como a região ativa (DELCROIX; TRINDADE, 1974; FERREIRA; DELCROIX, 1978). Uma teoria completa que descreva a natureza da região ativa está sendo ainda desenvolvida (POTTINGER, 2005).

2.5.2. Mecanismos de Ignição e operação

Em primeiro lugar, a ignição de um catodo ocorre porque uma pequena fração dos elétrons provenientes de todos os processos de emissão que ocorrem no interior do catodo é acelerada em direção ao eletrodo de vigia (devidamente polarizado), fazendo colisões com os átomos neutros do gás que ingressa e é expelido pelo catodo oco. Algumas destas colisões criam íons positivos que são acelerados então para o inserto (mantendo-o aquecido e em regime autossustentável). Quando os íons colidem com o inserto, mais elétrons são liberados da superfície do metal (emissão secundária de elétrons). Este processo causa uma avalanche de elétrons que conduzem para a ruptura dielétrica do gás e formação da descarga elétrica. O fenômeno de ruptura dielétrica de gases é bastante conhecido na literatura, na teoria de Townsend e a lei de Paschen (NASSER, 1971; PESSOA, 2005).

Em síntese, a tensão de ruptura dielétrica gasosa V_{Bk} está relacionada com a pressão, e a distância entre os eletrodos (entre o catodo e o eletrodo de vigia) pela lei de Paschen (NASSER, 1971). Resumidamente, para os catodos ocos esse conceito clássico complica-se pela natureza não plana da geometria, as altas velocidades, os elevados gradientes de pressão entre os eletrodos, a mudança das variáveis da expressão de Paschen pelo material emissor e

condições variáveis das superfícies devidas ao bombardeio de íons e à perda de bário (RUDWAN, 2003).

Já em operação, estudos recentes mostram que o mecanismo principal responsável pela entrada e saída de calor em catodos ocos resulta do processo que ocorre entre a interface do plasma e o inserto. Com esta interface o plasma é adjacente a uma superfície sólida, portanto, não existe neutralidade de carga nessa região. Aquela região é conhecida como a bainha de plasma, ou zona de carga espacial (MITCHNER; KRUGER, 1973). A região intermédia entre a bainha e o volume de plasma é considerada como a “pré-bainha”, ou zona de ionização. Os elétrons são acelerados em direção ao plasma pela queda de potencial na bainha. Ao atingir-se a região de “pré-bainha”, os elétrons adquirem energia para excitar ou ionizar átomos. As espécies ionizadas são aceleradas em direção à superfície do inserto, em concordância ao critério de Bohm (FRANKLIN, 2003; RIEMANN, 1991). O critério de Bohm é o requisito para a formação de uma bainha estacionária estável. Esse critério dita que os íons atravessem a fronteira de bainha de plasma com velocidade v_i igual ou maior que a velocidade acústica do íon, C_s ,

$$v_i \geq C_s \geq v_B \quad (2.8)$$

Onde,

$$v_B = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \quad (2.9)$$

Os íons, portanto, entram na bainha com uma velocidade mínima igual à velocidade de Bohm v_B , e bombardeiam a superfície do inserto causando aquecimento.

Os processos suposto que contribuem para o aquecimento interno do catodo oco quando está em regime autossustentável (depois da ignição onde não é necessário adicionar energia térmica ao catodo, em outras palavras com o aquecedor desligado), na ordem de importância são (POTTINGER, 2005):

bombardeio de íons, aquecimento Joule no volume do material, bombardeio atômico, bombardeio por elétrons e radiação do plasma. A energia térmica é dissipada por meio dos seguintes processos: extração de elétrons, evaporação de superfície, condução térmica e radiação do plasma. Tais processos estão mostrados na Figura 2.9.

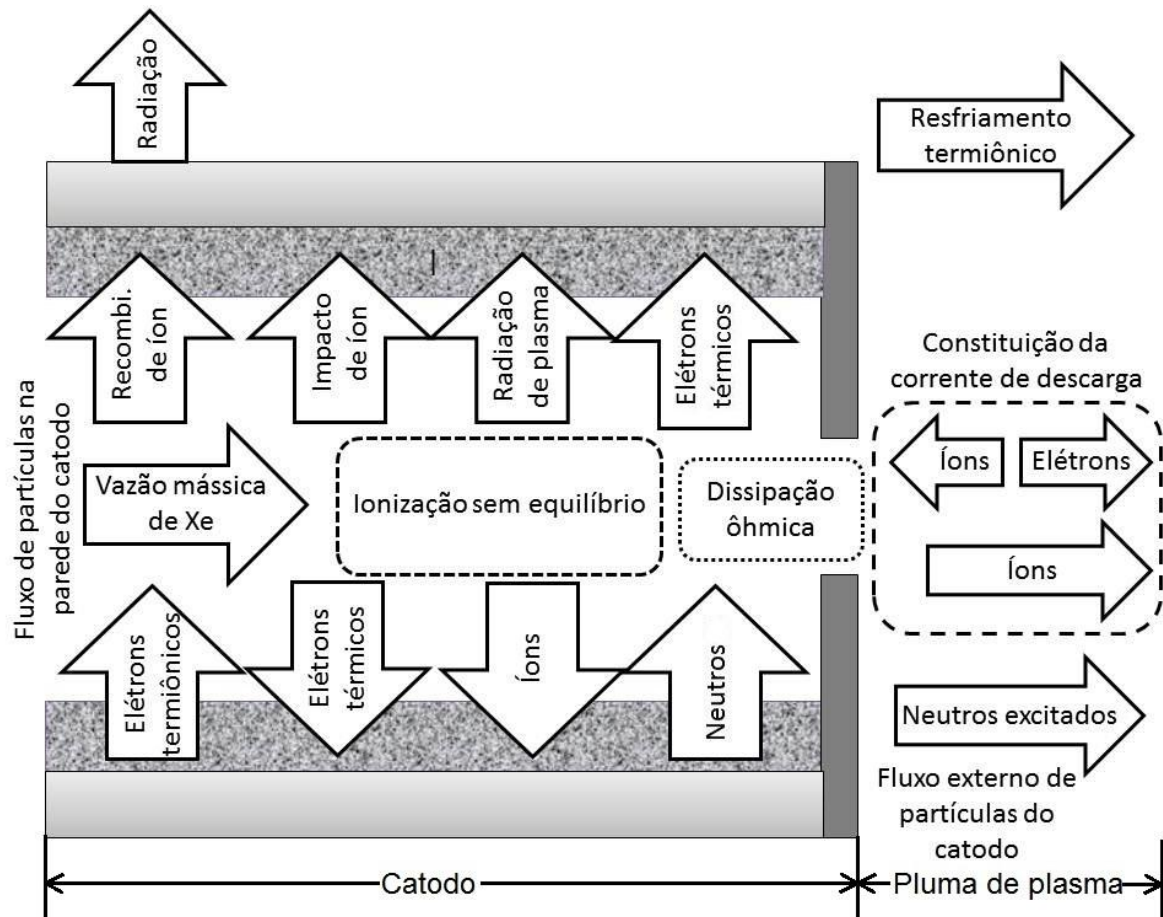


Figura 2.9-Esquema dos processos que contribuem ao aquecimento interno, processos de dissipação da energia interna e fluxo de partículas do catodo oco.

Fonte: Adaptado do Grubisic e Gabriel (2009).

O mecanismo de balanço térmico foi reduzido a uma equação de balanço térmico para o inserto do catodo oco. A equação considera a principal contribuição para aquecimento e esfriamento do catodo oco (POTTINGER, 2005; ROSSETTI et al., 2002):

$$q_{NET} + q_i + q_j + q_{ql} - q_s - q_c = 0 \quad (2.10)$$

Onde q_i é a energia que entra no catodo oco por meio do bombardeio de íon, q_j é o aquecimento de Joule, $q_{ql} - q_s$ é o aquecimento por radiação, q_{NET} é o aquecimento por meio de condução de calor e q_c é o aquecimento por extração de elétrons, respectivamente. É primordial que o processo térmico ocorrendo dentro do catodo oco seja entendido na ordem de aumentar o seu tempo de vida útil e melhorar seu desempenho (POTTINGER, 2005).

2.5.3. Regiões de plasma do catodo oco

Para maior entendimento dos processos que ocorrem no catodo oco, são estudadas quatro regiões de plasma, as quais são: região do inserto, região do orifício, região do catodo-eletrodo de vigia e região da pluma, como mostrado na Figura 2.10.

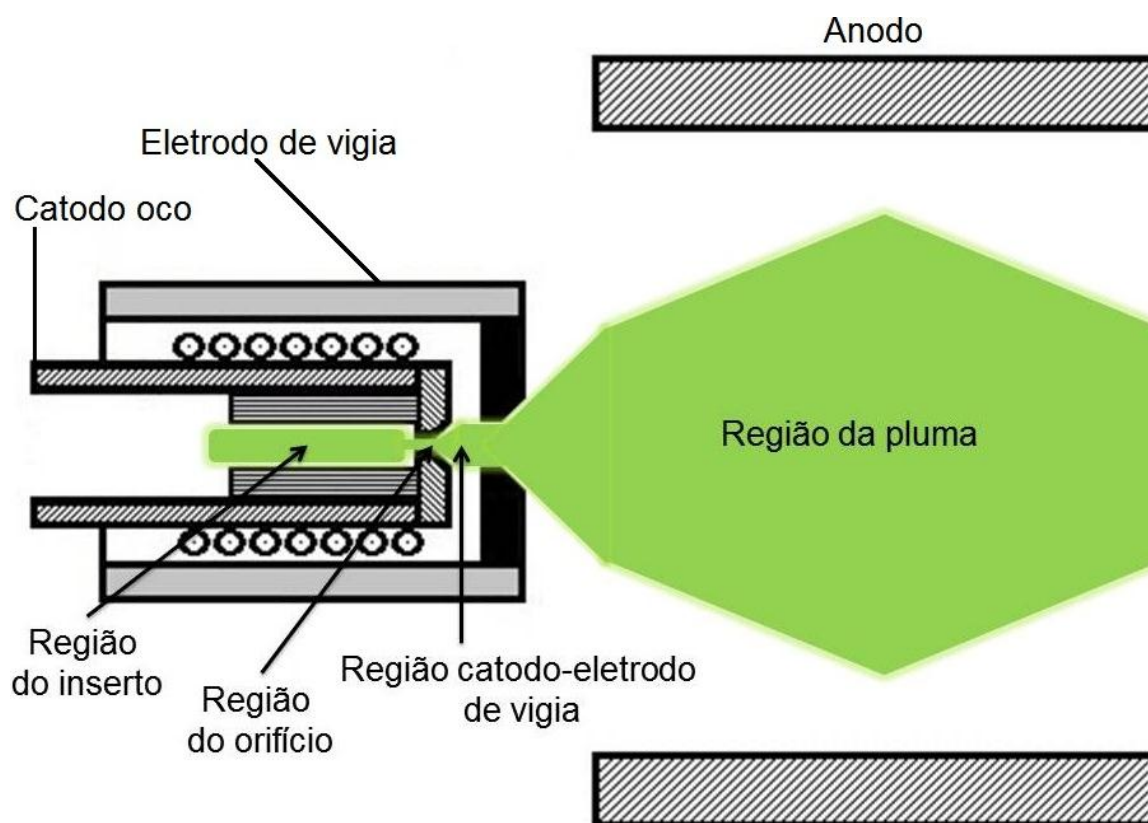


Figura 2.10- Diagrama das regiões de plasma do catodo oco.

Em primeiro lugar, na região do inserto o plasma é muito denso. Em segundo, na região do orifício existe alta densidade de corrente de elétrons, bem como na região de catodo-eletrodo de vigia. Por último, uma pluma difusa no exterior

do eletrodo de vigia se conecta ao anodo ou ao plasma principal do propulsor. Os íons gerados no plasma ao longo do dispositivo neutralizam a carga espacial de elétrons. Como resultado, os cátodos ocos podem produzir correntes elevadas e com baixas tensões em comparação com outros dispositivos catódicos de vácuo (GOEBEL; KATZ, 2008). São muitos os estudos teóricos feitos com respeito às regiões de plasma do catodo oco.

2.5.3.1. Região do inserto

As teorias sobre esta região indicam que há um plasma de alta densidade no interior do inserto. Adjacente à superfície do inserto é criada uma densidade de carga negativa. Os íons do plasma são acelerados em direção ao inserto pelo campo elétrico radial. Perto da superfície do inserto, a densidade de elétrons é relativamente alta e muitos destes fluem em direção ao plasma. Os fluxos dos íons e dos elétrons em direções opostas têm sido referidos por muitos autores como bainha dupla (PREWITT; ALLEN, 1976; SALHI; TURCHI, 1994; SIEGFRIED; WILBUR, 1983). A bainha dupla desenvolve-se no limite entre plasmas quase neutros de diferentes densidades. A bainha pode atrair íons para um plasma e elétrons para outro. Os elétrons termiônicos são acelerados pelo potencial da bainha. Dentro do catodo, o plasma contém duas espécies de população de elétrons tais como os primários e os secundários. Os elétrons primários são os elétrons de alta energia (Maxwellianos) nomeados assim pela terminologia de Siegfried e Wilbur (1983). Esses elétrons primários executam a maior parte da ionização dentro do catodo, por ionização de impacto de elétrons e por excitações passo a passo. Através destas colisões e colisões Coulombianas, os elétrons primários adquirem uma energia térmica típica de distribuição Maxwelliana. Somente elétrons térmicos na cauda da função de distribuição são capazes de fluir de volta para o inserto. Os demais elétrons térmicos (secundários) são acelerados em direção ao eixo do catodo e ao orifício pelo campo elétrico produzido pela polarização do eletrodo de vigia. Enquanto os íons na região do inserto são acelerados em direção à bainha dupla do inserto pelo campo elétrico radial. Os íons entram na bainha com ou acima da velocidade acústica, conforme o critério da bainha de Bohm (seção

2.5.2) (SIEGFRIED; WILBUR, 1983; SALHI, 1993; PREWITT; ALLEN, 1976; BOHM, 1949). As colisões e recombinações dos íons na superfície do inserto participam no aquecimento para sustentar a descarga. Esta corrente de íons também explica parte da corrente total do catodo. Os elétrons primários compõem o balanço da corrente de descarga para a região do inserto.

2.5.3.2. Região do orifício

Na região do orifício, as teorias estabelecem que seja formada uma bainha dupla entre as regiões de inserto e orifício (DOMOKOS, 1999). Os elétrons são acelerados na região do orifício por essa bainha, enquanto os íons da região do orifício que entram na bainha são acelerados na direção da região do inserto. Os gradientes de densidade e campo elétrico evitam que íons carregados na região de inserto entrem no orifício do catodo. Nesta região a maior densidade de corrente no catodo ocorre no orifício (MANDELL; KATZ, 1994).

2.5.3.3. Região catodo-eletrodo de vigia

As teorias na região entre o catodo e o eletrodo de vigia, estabelecem que nesta região as bainhas espessas se incrementem rapidamente e a densidade de corrente diminua consideravelmente. Se a densidade de corrente de íons emitidos é suficiente para manter a quase neutralidade, os elétrons rapidamente fluirão para o eletrodo de vigia devido à existência de um leve campo elétrico axial fora das bainhas. Esse modo de operação é referido como modo pontual (DOMOKOS, 1999). O modo pontual se caracteriza por uma vazão mássica relativamente alta, baixa tensão de descarga (8-22 V) e pouca flutuação na tensão.

No caso em que a vazão mássica é diminuída, a densidade de corrente de íons reage da mesma forma. Consequentemente, as temperaturas de elétrons aumentam devidas a uma diminuição nas colisões inelásticas e a forma do campo elétrico. A densidade de plasma na região é baixa, tal que muitos dos átomos excitados e íons decaem antes de colisões sucessivas os ionizarem. Este modo de operação é referido como modo pluma (DOMOKOS, 1999). Esse

modo é usualmente associado com uma pluma de plasma luminoso entre o catodo e o anodo. As características principais são a alta tensão de descarga (20-50V) e alta frequência nas flutuações do plasma. Algumas investigações têm postulado que a criação de íons dentro da distância entre o catodo e o eletrodo de vigia, nesse modo, conduz à erosão da ponteira do catodo. As frequentes flutuações na tensão aceleram os íons ao limite de pulverização catódica do material.

Os modos mencionados nos parágrafos anteriores serão discutidos em maiores detalhes na seção 2.7.

2.5.3.4. Região da pluma

Estudos experimentais realizados sobre a região da pluma, por Williams e Wilburt (1992), apontam a que existe uma formação de um “morro” de potencial a jusante do eletrodo de vigia. Eles postularam que imediatamente a jusante do eletrodo de vigia, a densidade de plasma é ainda suficiente para que a ionização ocorra (DOMOKOS, 1999; WILLIAMS; WILBUR, 1992).

A região da pluma é especialmente crítica para determinar a emissão de corrente que um propulsor de plasma pode fornecer. Dadas às típicas geometrias de propulsores dos tipos Hall e iônicos, o feixe de plasma está estreitamente acoplado ao plasma do catodo. Por último, a expansão do plasma do catodo não pode ser tratada sem consideração desse feixe (DOMOKOS, 1999). O plasma da região da pluma é o principal objeto de estudo desse trabalho de mestrado.

2.6. Descargas elétricas em gases

Em uma descarga elétrica, a condução elétrica através do gás ionizado (plasma) não segue a lei de ohm, mas é regida pelos processos físicos fundamentais que são produzidos entre as partículas carregadas (elétrons, íons, átomos e moléculas excitadas), transportados no plasma, produzidas e absorvidas nos eletrodos. Para melhor entendimento das descargas elétricas em gases, deve-se analisar o comportamento das partículas e os processos

fundamentais que são produzidos na coluna de plasma e na região entre os eletrodos ou em cada eletrodo (catodo, eletrodo de vigia e anodo). O catodo é muito importante no processo de descarga, já que nele surgem os elétrons que junto com os íons são as partículas fundamentais nos processos de descarga.

Para as descargas elétricas, variações na tensão da fonte de alimentação podem causar mudanças na tensão e na corrente de descarga. Estes parâmetros são descritos pela dependência típica da corrente da descarga, sobre a tensão aplicada e é chamada de característica V-I de descarga. Por exemplo, para descargas elétricas de gases em baixas pressões existem três tipos, sendo elas: descarga escura, descarga luminescente (descarga Glow) e descarga de arco elétrico, as quais estão ilustradas na Figura 2.11 (PESSOA, 2005).

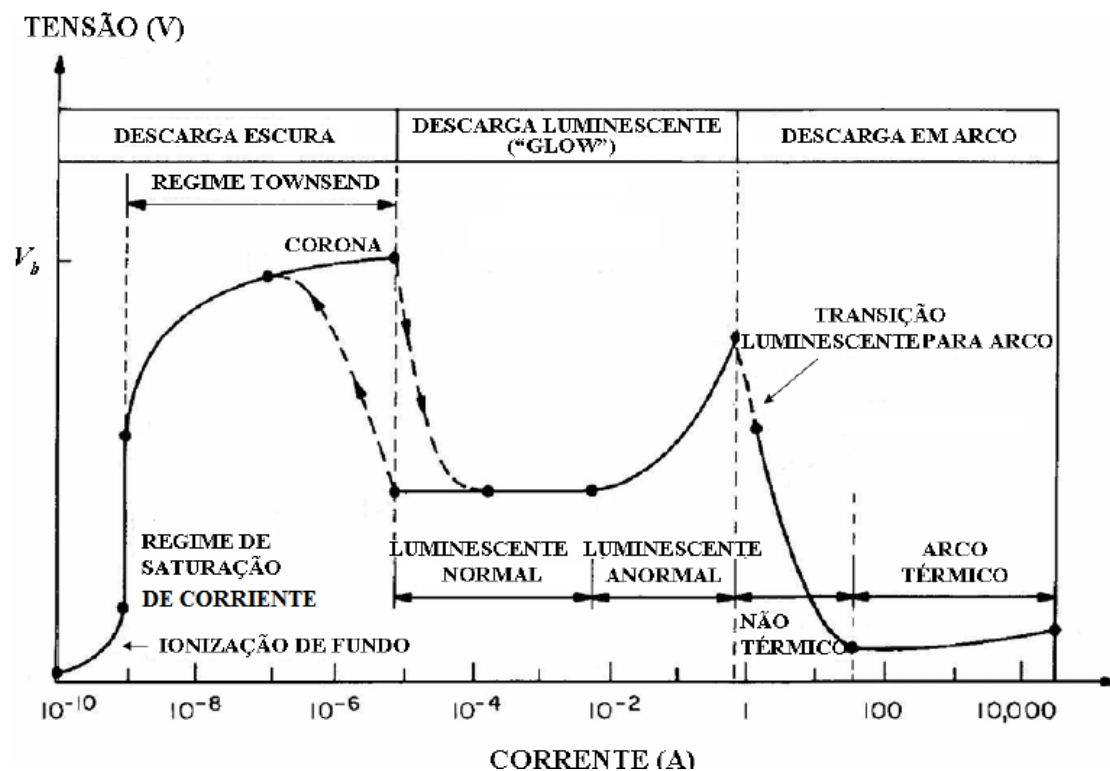


Figura 2.11- Característica V-I de uma descarga elétrica em corrente contínua.
Fonte: Pessoa (2005).

A zona de descarga escura, na Figura 2.11 recebe seu nome, já que a excitação do meio gasoso é tão pequena que não se observa emissão de luz.

Neste tipo de descarga, a corrente aumenta com a tensão e isso ocorre até que a corrente adquira um valor de saturação, devido ao tempo de trânsito das cargas ser menor que o tempo de criação das ditas cargas. Para tensões superiores à da região de saturação, a descarga se desenvolve por mecanismos de multiplicação por avalanche, com emissão de elétrons por parte do catodo, denominada zona de descarga de Townsend, que é a região de descarga onde as correntes são muito fracas.

A descarga luminescente deve sua denominação à emissão de radiação visível que se produz. O plasma neste caso é debilmente ionizado e em um estado de não equilíbrio o qual é visível como uma coluna brilhante. Neste caso, como na descarga Townsend, os elétrons são emitidos por impacto de íons sobre o catodo frio. No início do modo luminescente normal é gerado um campo elétrico elevado que acelera os íons em direção ao catodo. Gera-se uma coluna positiva, que é um plasma de não equilíbrio térmico, mas quase neutro eletricamente. Neste caso, também a tensão da descarga é constante e a intensidade de plasma varia porque a área transversal na qual se manifesta a descarga aumenta.

Na zona de descarga luminescente anormal, a corrente aumenta exponencialmente até atingir o ponto de transição de descarga luminescente a arco. Neste ponto a corrente é tão intensa que é capaz de aquecer o catodo até a incandescência, produzindo intensa emissão termiônica e dando lugar a um arco, passando por uma transição instável denominada transição luminescência-arco. A queda catódica para o arco é menor que para a descarga luminescente normal. A região de arco não térmico se denomina assim porque o plasma gerado não está em equilíbrio termodinâmico (temperatura de elétrons, íons e neutros são diferentes). A zona de arco térmico constitui um plasma mais perto ao equilíbrio termodinâmico. Os arcos elétricos são descargas de alta corrente (>100 A) e muito brilhantes. Diferenciam-se das descargas luminescentes nos mecanismos de emissão de elétrons. Nos arcos, os elétrons são emitidos através de processos

termodinâmicos, devido ao aquecimento do catodo. O plasma gerado se encontra em equilíbrio termodinâmico.

2.7. Regimes de operação de descarga do catodo oco

A operação em regime estável de um catodo oco não é dada em termos de um simples tipo de descarga. Como visto nas seções anteriores, o desempenho dos catodos ocos é crítico, pois depende de fatores extremos incluindo a configuração geométrica, circuito elétrico de corrente de descarga, dimensionamento e posicionamento dos eletrodos utilizados. O processo típico na descarga de um catodo oco é complexo e ainda não é completamente conhecido. Como fator de dificuldade existem os regimes ou também chamados modos de descarga. Então, os catodos podem operar em modo pluma, modo difusivo e modo pontual. Além disso, as transições dos modos são também importantes na operação do catodo. Estabelecer um regime de operação depende de parâmetros operacionais tais como, a vazão mássica de gás e as características da descarga (corrente e tensão).

Em seguida, serão delineadas as características dos regimes de operação segundo o observado nos estudos experimentais com catodos ocos.

2.7.1. Modo pluma

O modo pluma é caracterizado por uma descarga ruidosa com tensão elevada. Visualmente, pode ser observada uma pluma brilhante luminosa que se estende a jusante da ponta do catodo oco. Esse modo ocorre com baixa vazão mássica, baixa corrente de descarga e relativamente elevada tensão de descarga. Um aumento significativo na tensão de descarga aumenta proporcionalmente a potência de descarga conforme a relação:

$$P_D = I_D V_D \quad (2.11)$$

Para os três diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga no catodo oco (vide Figura 1.2), a corrente de descarga e a tensão de descarga correspondem a:

- Configuração diodo com anodo: $I_D = I_A; V_D = V_A$
- Configuração diodo com eletrodo de vigia: $I_D = I_{ev}; V_D = V_{ev}$
- Configuração tríodo: $I_D = I_A + I_{ev}; V_D = V_A + V_{ev}$

Onde os subscritos A e ev , referem-se ao anodo e eletrodo de vigia, respectivamente. A equação 2.11 é aplicada também para os outros modos de operação.

No modo pluma é usual observar alta frequência de oscilação do plasma, no entanto, existe estabilidade nesse modo para altas vazões mássicas ou para altos valores de corrente de descarga.

2.7.2. Modo difusivo

O modo difusivo foi descoberto e investigado em um estudo experimental realizado na Universidade Metropolitana de Tokyo - TMU (SAKAI et al., 2007). Nesse estudo se observou um plasma de luminescência intensa, não somente no volume dos eletrodos, mas também em toda a região do espaço no interior da câmara. Como resultado das medições de oscilação de corrente, eles encontraram que o modo está na faixa de frequência de quilohertz a vários Mega-hertz. Além disso, sugerem que as frequências de corrente de anodo e eletrodo de vigia aumentam na transição do modo pluma ao modo difusivo. Adicionalmente, observaram que com o aumento da corrente do anodo a luminescência é mais intensa. Uma das suposições que fizeram com respeito ao fenômeno de oscilação na frequência é que possa ser influenciada pela temperatura dos íons. O modo difusivo é estabelecido tipicamente para baixas vazões mássicas, altos e baixos valores de corrente de descarga, mas sempre com elevada tensão de descarga.

2.7.3. Modo pontual

O modo pontual é associado com baixa tensão e baixo ruído na descarga. Visualmente, um ponto intenso luminoso é observado perto do orifício. Esse

modo ocorre com alta vazão mássica e alta corrente de descarga. Primeiramente, o catodo oco opera no modo pluma e aumentos sucessivos na corrente de descarga e na vazão mássica estabelecem uma rápida transição, que resultam no modo pontual.

Algumas teorias sugerem que existe um alto grau de ionização no modo pontual (SIEGFRIED; WILBUR, 1984). Teoricamente os elétrons são confinados na região do orifício do catodo pela bainha interna, isso pode explicar a aparência visual de um ponto intenso. Por outro lado, no modo pluma a bainha estendida não confina elétrons, o que resulta numa aparência de pluma brilhante. Embora essa teoria apareça para explicar as diferenças visuais entre os modos, as conclusões são inconsistentes com investigações anteriores.

Investigações posteriores mostram que as densidades de corrente de elétrons no modo pontual e no modo pluma são aproximadamente iguais. A espessura da bainha para ambos os modos de operação é pelo menos uma ordem de magnitude menor que o diâmetro do orifício (SIEGFRIED; WILBUR, 1984).

2.7.4. Transição do modo pluma a pontual

Provavelmente, a transição de modos seja um dos estados que mais curiosidade cause nas investigações com catodos ocos. Por essa razão, várias teorias foram desenvolvidas para explicar as características de mudança de modo (POTTINGER, 2005).

Uma das investigações teóricas realizadas por Mandell e Katz (1994), propõe que a mudança de modo ocorra devido ao mecanismo de coleção de corrente associado com o eletrodo de vigia. Essa teoria fundamenta-se no princípio de balanço de corrente. Sugere que para alta vazão mássica, a corrente de descarga e a produção de íons são suficientes para que o eletrodo de vigia seja “passivamente” capaz de coletar corrente por meio de processos de difusão. O eletrodo de vigia é capaz de coletar passivamente corrente porque está localizado muito próximo ao catodo oco, na região de alta densidade de

corrente. Mas, tal teoria não explica a persistência da mudança de modo quando o catodo oco é operado conforme o circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo.

Um mecanismo de coleção de corrente de anodo alternativo foi desenvolvido por Rudwan (2003) e está baseado no fato de que a capacidade de coleção de corrente num eletrodo é dependente da sua área superficial. Essa teoria utiliza a estimativa dos perfis de potencial de plasma e o número de densidade de elétrons obtidos em experimentos com sondas de Langmuir (SIEGFRIED; WILBUR, 1984).

Resumindo, os fenômenos físicos que podem ser responsáveis pela transição do modo pluma ao modo pontual são listados a seguir (POTTINGER, 2005):

- Movimento da fronteira de bainha do catodo oco
- Expansão da corrente de emissão para o orifício
- Mecanismos de coleção de corrente do eletrodo de vigia
- Mecanismos de coleção de corrente do anodo
- Interação do feixe de plasma (instabilidade eletrostática)

2.8. Possíveis falhas e perdas nos catodos ocos

Os fatores que podem causar falhas ou degradar o desempenho dos catodos ocos são: superaquecimento de peças, contaminação do inserto e pulverização catódica (SIMPSON et al., 2003). Em primeiro lugar, o superaquecimento de peças e a contaminação do inserto causam esgotamento de bário e impedem a liberação de quantidades suficientes, de tal forma que limitam a produção adequada de elétrons. Tais problemas podem ser superados com um bom projeto, implementação de procedimentos de operação apropriados e utilização de propelentes de alta pureza.

Por último, a erosão do material do catodo oco, por pulverização catódica, é um problema mais complexo e é um fenômeno que não está totalmente compreendido (DOMOKOS, 1999). Esse mecanismo leva à criação de íons

com alta energia que bombardeiam as superfícies do catodo oco. Como consequência, a erosão dos componentes pode causar a diminuição da eficiência e da vida útil do catodo.

3 METODOLOGIA

No LAP/INPE foi realizado um estudo experimental para caracterizar o comportamento de catodos ocos, a fim de que estes possam ser aplicados na propulsão iônica. O estudo experimental consistiu em testar catodos ocos utilizando-se insertos de folha de tântalo enrolada e variando-se dois de seus parâmetros geométricos: o diâmetro do orifício da ponteira do catodo e o diâmetro do orifício da ponteira do eletrodo de vigia. Os catodos foram operados com diferentes vazões mássicas, correntes e tensões de descarga e com os três diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga conforme a Figura 1.2.

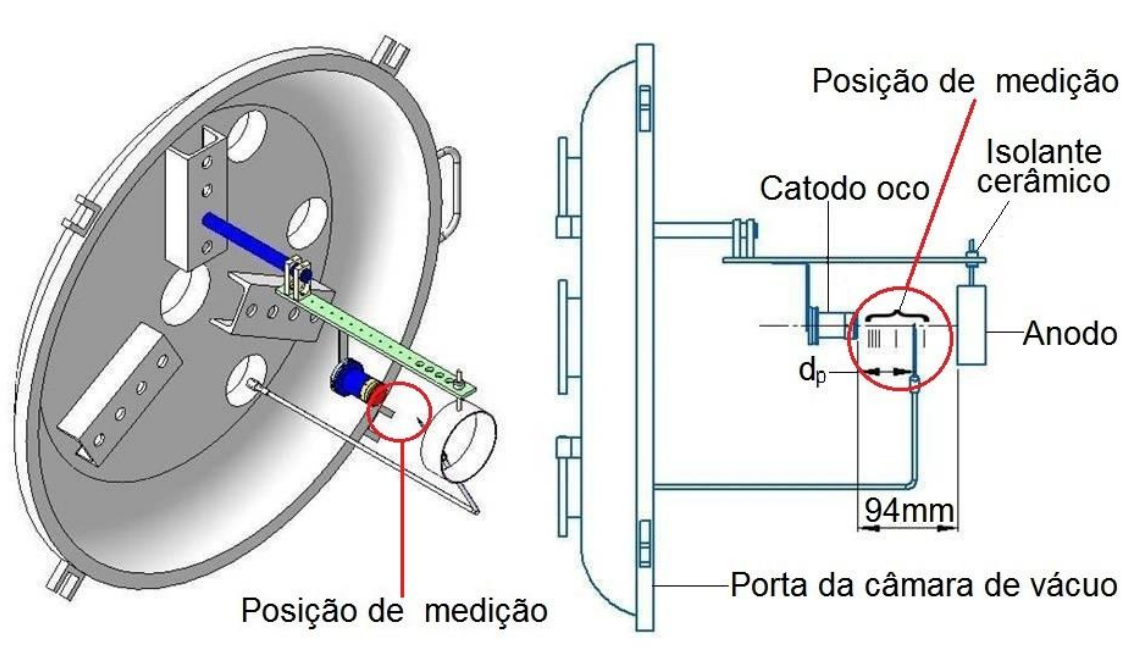


Figura 3.1- Desenho esquemático da montagem do experimento na porta da câmara de vácuo.

Os circuitos elétricos de corrente de descarga dependem se a corrente de elétrons é coletada pelo eletrodo de vigia, ou pelo anodo ou por ambos. No experimento, os eletrodos estavam localizados em distâncias fixas com respeito aos catodos. Para todos os catodos, o eletrodo de vigia estava distanciado de 0,6 mm, enquanto, o anodo estava distanciado de 94 mm conforme a Figura 3.1.

Em diversas condições de operação, foi possível observar os regimes ou modos de descarga dos catodos (modo pluma, modo difusivo e modo pontual), registrando-se, assim, suas características.

Na região da pluma dos catodos testados foram obtidos os perfis dos parâmetros de plasma, tais como a temperatura de elétrons, a densidade de plasma, o potencial de plasma e o comprimento de Debye. Isso foi possível pelo uso de um sistema intrusivo de sonda de Langmuir cilíndrica simples. A sonda de Langmuir se movimentou ao longo da distância axial d_p com respeito ao catodo oco (Figura 3.1) e com um sistema de aquisição de dados conectado à sonda foram executadas as medições. Os dados adquiridos foram em seguida pós-processados e analisados.

3.1. Instalações

3.1.1. Câmara de vácuo, espectrômetro de massa e alimentação de gás

A Figura 3.2 ilustra a câmara de vácuo com seu sistema de bombeamento, o sistema de bombeamento do espectrômetro de massa e o sistema de alimentação de gás. Conforme essa figura, a câmara de vácuo está equipada com duas bombas turbo-moleculares com velocidade total de bombeamento de 4600 l/s para N_2 . Tais bombas estão conectadas por sua vez a uma bomba Roots de 250 m³/h e a uma bomba rotativa de duplo estágio de 80 m³/h. No sistema de bombeamento da câmara de vácuo, as bombas turbo moleculares têm a função de permitir o alto vácuo (ou seja, o fluxo é molecular dentro da câmara de vácuo com pressões entre 10 e 10⁻⁵ Pa). Enquanto isso, a bomba Roots e a bomba rotativa realizam o vácuo preliminar requerido para que as bombas turbo moleculares iniciem seu trabalho. Dessa maneira, a pressão de base da câmara de vácuo sem carga de gás é cerca de 3x10⁻⁶ Pa. A câmara de vácuo pode atingir pressões de trabalho entre 2 e 5x10⁻⁴ Pa, dependendo da vazão mássica de gás aplicada.

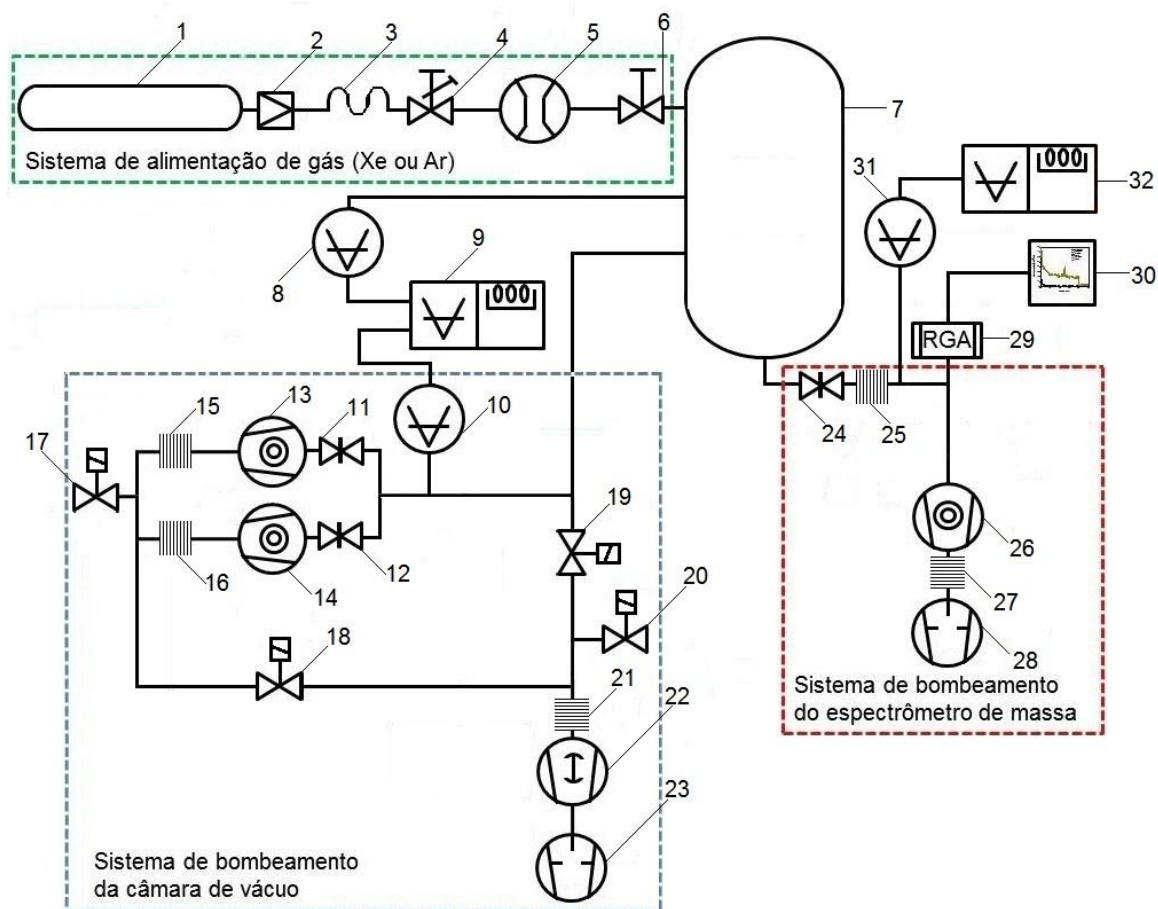


Figura 3.2- Desenho esquemático do sistema de alimentação de gás, sistema de bombeamento da câmara de vácuo e o sistema de bombeamento do espectrômetro de massa. (1) cilindro de gás, (2) regulador de pressão, (3) tubulação flexível, (4) válvula de agulha, (5) medidor de vazão mássica, (6) válvula de acionamento manual, (7) câmara de vácuo, (8) (10, 31) medidores de vácuo, (9, 32) unidades de controle dos medidores, com display digital, (11, 12, 24) válvulas de gaveta, (13, 14, 26) bombas tubo moleculares, (15, 16, 21, 25, 27) linhas flexíveis, (17, 18, 19, 20) válvulas eletromagnéticas, (22) bomba Roots, (23, 28) bombas rotativas, (29) unidade analisadora de gás residual RGA, (30) computador.

No sistema de alimentação de gás para esse experimento, a vazão de gás que entra no catodo é regulada pela válvula de agulha conforme a Figura 3.2. A unidade de medida da vazão mássica é dada em centímetros cúbicos padrão por minuto, sccm. Prosseguindo, para um gás ideal a conversão de sccm a miligramas por segundo em condições normais de temperatura e pressão é dada pela seguinte equação:

$$1 \text{ sccm} = 7,43583 \times 10^{-4} M_a \left[\frac{mg}{s} \right] \quad (3.1)$$

No caso do gás xenônio, com 131,293 UMA, obtém-se que:

$$1 \text{ sccm (Xe)} = 0,0983009 \left[\frac{mg}{s} \right]$$

e para o argônio de 39,948 UMA,

$$1 \text{ sccm (Ar)} = 0,02970465 \left[\frac{mg}{s} \right]$$

Os valores acima, para os gases xenônio e argônio, são importantes para comparar as vazões mássicas entre os diferentes testes realizados com o catodo oco.

O espectrômetro de massa, por sua vez, é utilizado para análises e determinação qualitativa e quantitativa de estruturas orgânicas e inorgânicas, ou em outras palavras, pode providenciar informação detalhada sobre um determinado composto químico. Para isso, o princípio de funcionamento do espectrômetro de massa baseia-se na obtenção de íons a partir de moléculas orgânicas e inorgânicas em fase gasosa. Uma vez obtidos, esses íons, separam-se de acordo com sua massa e sua carga. Finalmente, são detectados por meio de um dispositivo adequado. Como resultado, o espectrômetro de massa pode fornecer uma informação bidimensional que representa um parâmetro relacionado com a quantidade dos diferentes tipos de íons, em função da relação massa/carga de cada um deles.

No espectrômetro de massa também é necessário manter um ambiente de vácuo, assegurando-se ausência de colisões dos íons no seu interior. Por essa razão, no caso desse estudo, o sistema de bombeamento de vácuo do espectrômetro de massa está composto por uma bomba turbo molecular com velocidade de bombeamento de 240 l/s (N₂), conectada à uma bomba rotativa de 5 m³/h. A Figura 3.2 ilustra em detalhe esse sistema de bombeamento.

Na Figura 3.3 e 3.4 são mostradas duas fotografias da câmara de vácuo, parte do sistema de alimentação de gás e o espectrômetro de massa.

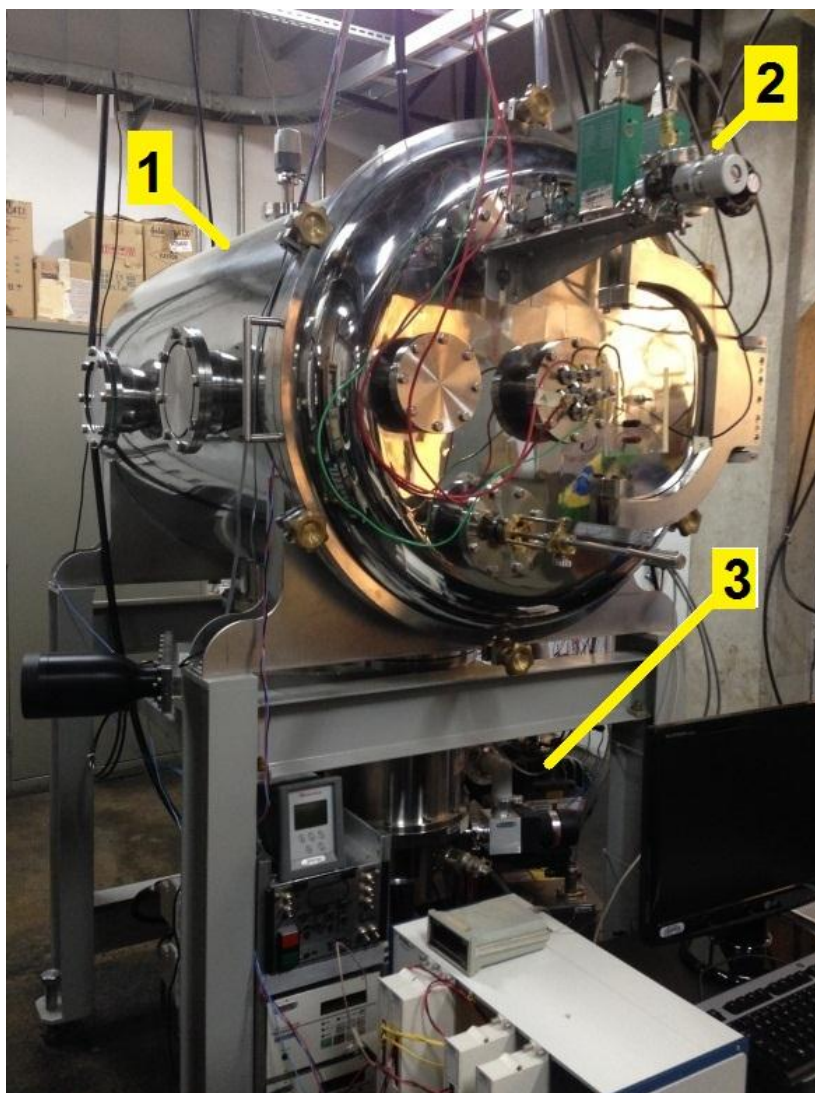


Figura 3.3- (1) Câmara de vácuo, (2) parte do sistema de alimentação de gás, (3) sistema de bombeamento da câmara de vácuo.

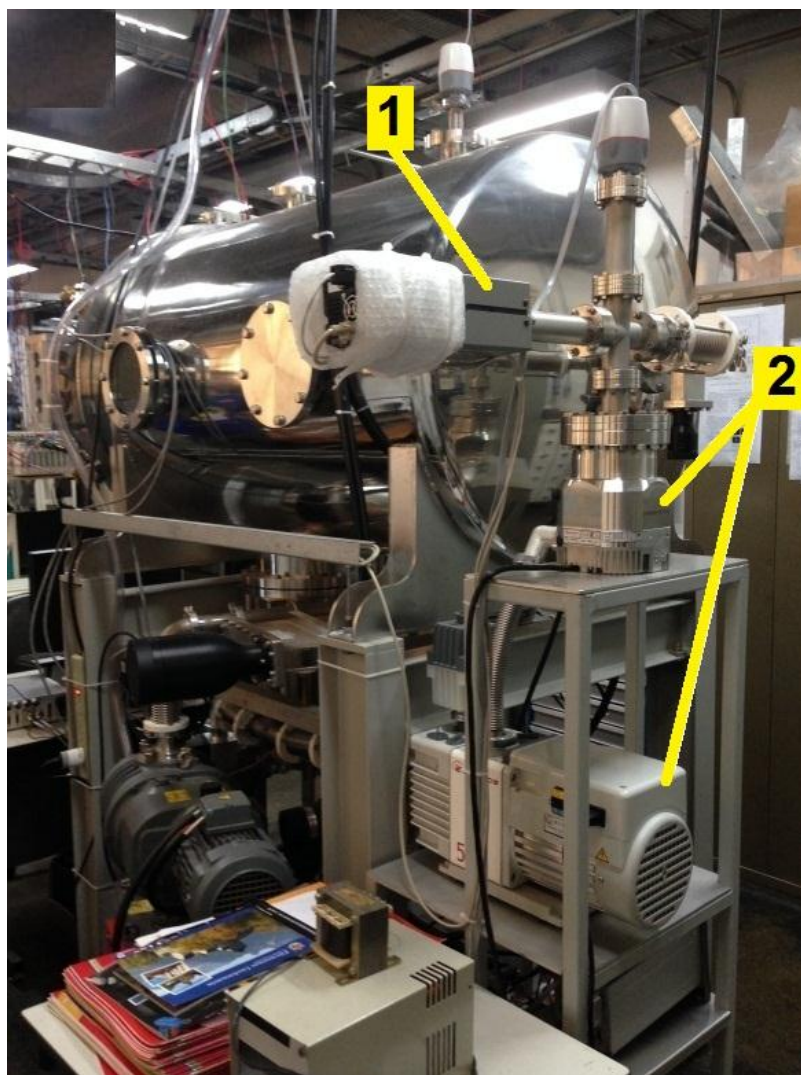


Figura 3.4- (1) espectrômetro de massa e (2) sistema de bombeamento do espectrômetro de massa.

3.1.2. Fontes de tensão

O desenho esquemático do circuito elétrico do experimento está ilustrado na Figura 3.5. Conforme este esquema foram utilizadas quatro fontes de tensão neste estudo: fonte de tensão do aquecedor, fonte de tensão do eletrodo de vigia, fonte de tensão da sonda e fonte de tensão do anodo. Uma fotografia destas fontes está mostrada na Figura 3.6.

O modelo da fonte de tensão que se utilizou para aquecimento é uma Agilent Technologies modelo N8760A que fornece uma tensão de 0V até 150 V com correntes de 0A até 34 A.

A fonte de tensão que se utilizou para alimentar o eletrodo de vigia é uma Spellman modelo SR6, que fornece uma tensão entre 0 e 2kV com corrente de até 3A.

A tensão do anodo foi fornecida por uma fonte modelo 6575A #507 da Agilent Technologies, cuja tensão está entre 0 e 200V com correntes entre 0 e 11A.

Finalmente, a fonte de tensão bipolar que se utilizou para a sonda é uma KEPCO modelo 200-1M, a qual pode fornecer tensões variáveis entre $\pm 200V$ e correntes de $\pm 1A$.

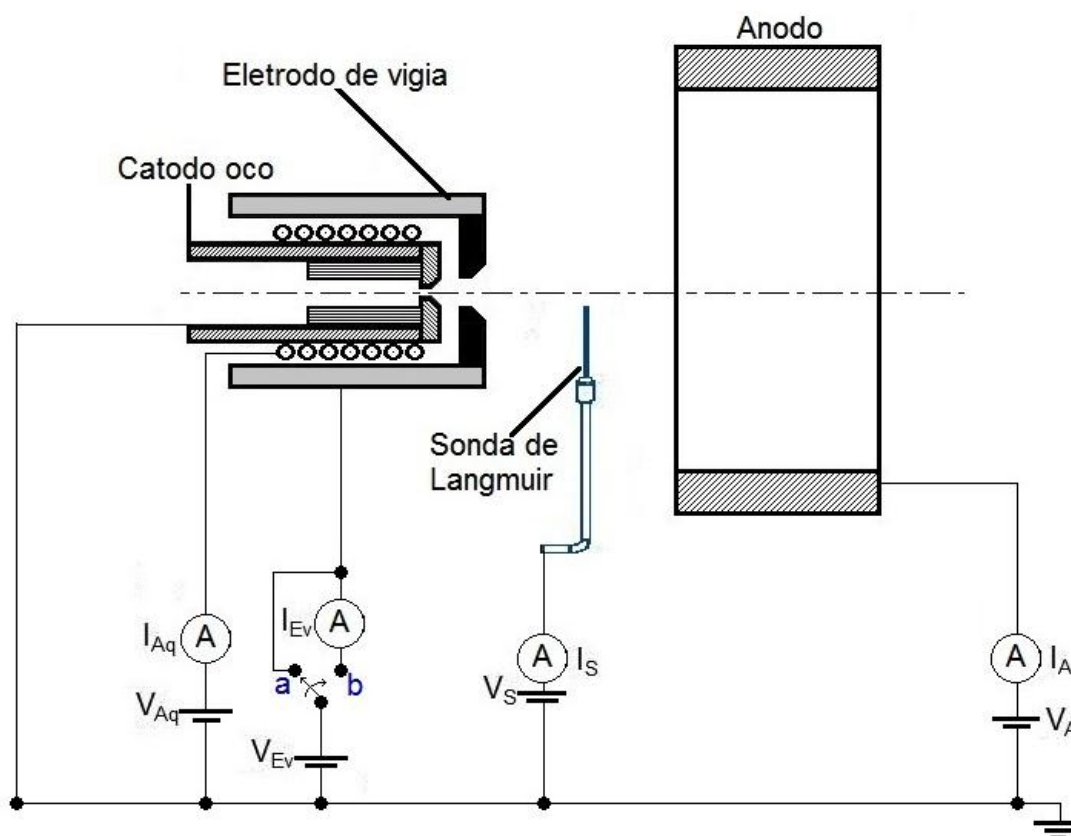


Figura 3.5- Esquema elétrico do experimento, onde: I_{Aq} é a corrente e V_{Aq} é a tensão de aquecimento, I_{Ev} é a corrente e V_{Ev} é a tensão do eletrodo de vigia, I_S é a corrente e V_S é a tensão da sonda, I_A é a corrente e V_A é a tensão do anodo.

Na Figura 3.5 pode-se localizar uma chave comutadora para seleção do modo de leitura de corrente de elétrons através do amperímetro da fonte de alimentação ou de um multímetro. Estando a chave na posição (b), a fonte de

alimentação do eletrodo vigia é ligada e, com isto, pode-se medir a corrente de emissão de elétrons do catodo durante o processo de aquecimento. Neste caso, os valores da corrente de emissão de elétrons, na faixa entre algumas dezenas de microampères e de algumas dezenas de miliamperes, podem ser medidos pelo multímetro. Uma vez atingido um dado valor de saturação de corrente eletrônica, a fonte de tensão é desligada e a chave comutada para posição (a), quando, então, uma dada vazão mássica de gás é estabelecida através do catodo e a fonte de tensão pode ser ligada novamente de forma ao catodo entrar em ignição. Nesta condição a corrente pode ser medida diretamente pelo amperímetro da fonte de tensão. Tal procedimento foi necessário para evitar maiores danos, por sobrecarga de corrente, ao multímetro durante e após o processo de ignição do catodo.



Figura 3.6- Fotografia das fontes de tensão utilizadas no experimento.

3.1.3. Sonda de Langmuir simples

Uma sonda de Langmuir realiza o diagnóstico básico dos parâmetros de plasma, principalmente, obtendo a densidade de elétrons n_e , a temperatura de elétrons T_e , o potencial flutuante ϕ_f , e o potencial de plasma ϕ_p . A estimativa desses parâmetros é possível pela exposição de um fio de tungstênio ao plasma. Em seguida, o fio é polarizado com diferentes tensões positivas e negativas por uma rampa triangular, de forma que uma fonte bipolar programável controlada por um sistema de aquisição de dados permita a obtenção de uma curva de sonda característica I-V, similar à mostrada na Figura 3.7. Logo após, no pós-processamento do sistema são calculados alguns dos parâmetros de plasma, segundo a informação da curva característica I-V. Depois de obtida cada curva, a sonda é retirada do plasma rapidamente. Assim mesmo, tem que ser exposta pelo menor tempo possível, evitando perturbar o menos possível o plasma.

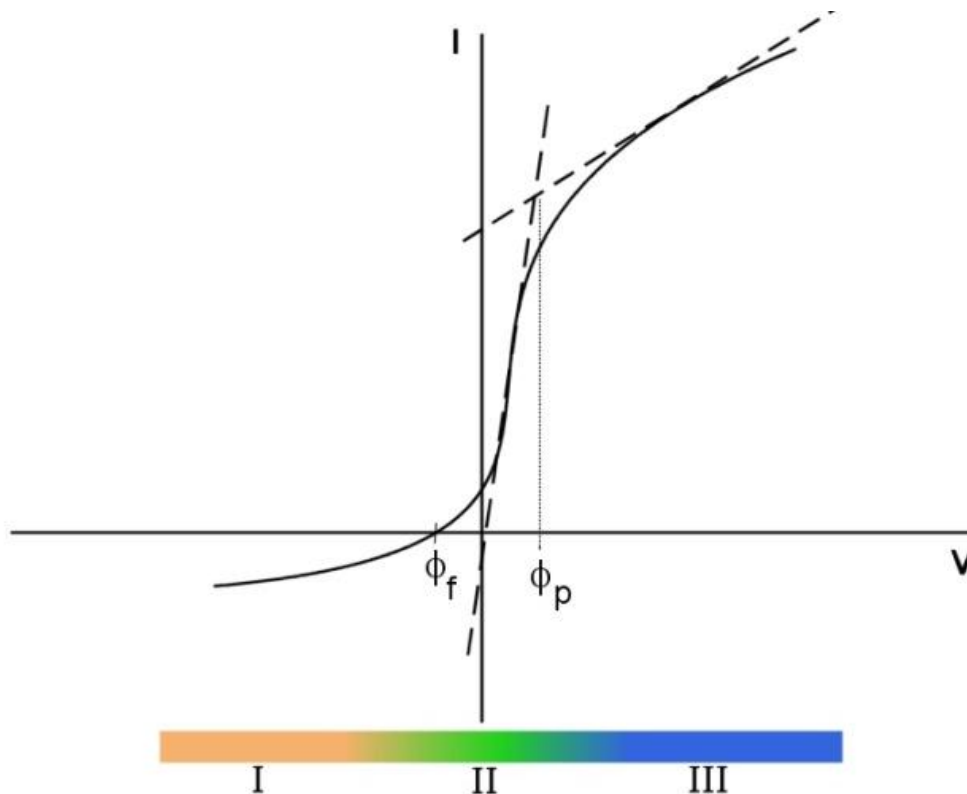


Figura 3.7- Curva de sonda característica I-V e suas regiões: I é a região de saturação de íons, II é a região de transição e III é a região de saturação de elétrons.

No caso desse estudo foi utilizada uma sonda cilíndrica simples composta por um fio de tungstênio com 120 mm de comprimento total e 1 mm de diâmetro. O comprimento exposto ao plasma para coleção de dados é de 8 mm do fio de tungstênio. O resto do comprimento é introduzido num tubo isolante de alumina que tem um diâmetro interno de 1,4 mm e um diâmetro externo de 3 mm. Um mandril trava o tubo isolante utilizando uma bucha de teflon. No interior do tubo uma solda de estanho conecta o fio de tungstênio com um fio de cobre isolado por teflon padrão. Esse último é conectado na fonte de tensão da sonda. De acordo com o descrito, a sonda está ilustrada na Figura 3.8.

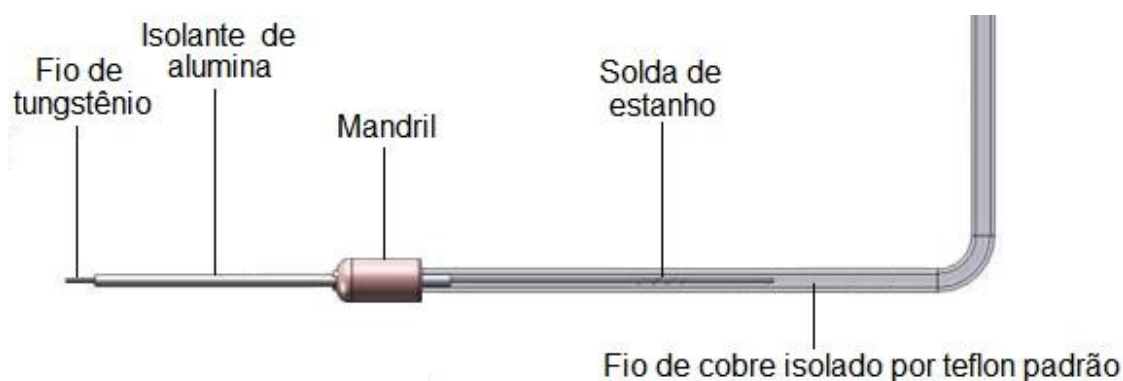


Figura 3.8- Ilustração dos componentes da sonda de Langmuir simples.

O algoritmo de pós-processamento de dados utilizado nesse estudo foi desenvolvido no ITA utilizando a plataforma de LabView(TM) (PESSOA et al., 2007) e foi adaptado para o estudo de catodos ocos por Pereira (PEREIRA, 2012). No algoritmo são utilizadas aproximações numéricas e físicas para calcular os parâmetros de plasma nas diferentes regiões da curva característica I-V (Figura 3.7). Nesse sentido, para o entendimento de como funciona o algoritmo descrito, a seguir estão os métodos de cálculo nas regiões da curva característica I-V.

A curva característica I-V na Figura 3.6 é uma curva de corrente coletada em função da tensão aplicada na sonda, nela três regiões podem ser diferenciadas: região I de saturação de íons, região II de transição e região III de saturação de elétrons. Em resumo, são utilizadas diferentes teorias de

sonda conforme cada parâmetro a ser obtido, e estão no manual de sonda elaborado por Pessoa et al. (2007).

Em primeiro lugar, é determinado o potencial flutuante na região II de transição, tal potencial é definido como o lugar onde a soma das correntes de íons e elétrons é nula. Em segundo lugar, o potencial de plasma ϕ_p pode ser determinado de três formas, sendo elas: 1- o valor de potencial para o qual ocorre um ponto de máximo na primeira derivada da curva característica I-V; 2- o valor do potencial no qual a segunda derivada da curva característica I-V é nula; e 3- a intersecção das assíntotas das regiões II e III num diagrama semi-logarítmico da curva característica I-V. Das três maneiras de determinar o potencial de plasma, 1 e 2 são conhecidas como método de derivada e são os métodos mais exatos, enquanto a 3 é conhecida como o procedimento de Langmuir. Logo depois de obter o potencial de plasma, imediatamente pode ser obtida a corrente de saturação de elétrons na região II da curva característica I-V. Com isto, podem ser obtidos os demais parâmetros de plasma.

Por exemplo, a densidade de íons pode ser obtida mediante a teoria de movimento orbital limitado, OML, por sua sigla em inglês. Resumidamente, plota-se para a região de saturação de íons um gráfico de $(I_i)^2$ versus V_{sda} conforme a Figura 3.9 (PESSOA et al., 2007).

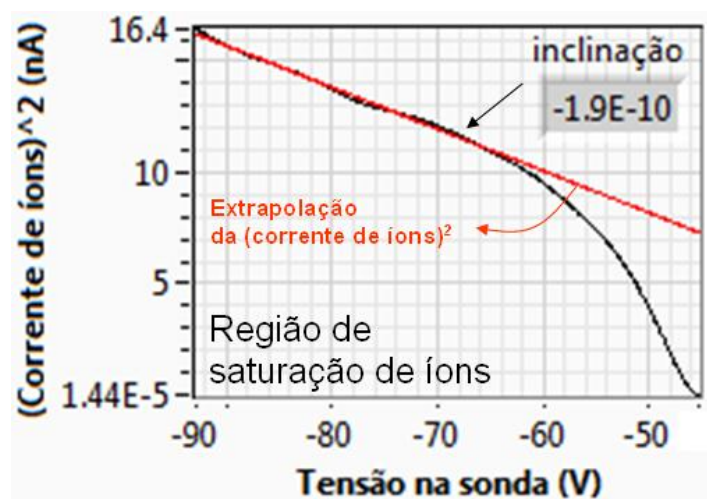


Figura 3.9- Gráfico do quadrado da corrente de íons em função da tensão de polarização da sonda (região de saturação de íons).
Fonte: Pessoa et al. (2007).

A partir desse gráfico, traça-se uma reta tangente à curva cuja inclinação permite calcular n_{i_OML} através da relação:

$$n_{i_OML} = 1.42 \times 10^{15} \frac{(M[u.m.a])^{\frac{1}{2}}}{A_{sda}[m^2]} (-inclinacao)^{\frac{1}{2}} \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (3.2)$$

Por outro lado, a temperatura de elétrons é estimada filtrando inicialmente a corrente de íons da curva I-V, dessa forma, é obtida outra curva $I_e - V$. Logo, a temperatura de elétrons pode ser calculada pelo procedimento de Langmuir, bem como pelo ajuste exponencial e o método de Druyvesteyn. Esse último método utiliza a função de distribuição de energia dos elétrons – FDEE e é o método mais exato, visto que para seu cálculo é usado o potencial de plasma estimado pelo método de derivada.

Então, para calcular a temperatura de elétrons pelo procedimento de Langmuir, na região II de transição da curva característica I-V, a corrente coletada pela sonda tem um comportamento exponencial com a tensão,

$$I_e(V_{sda}) = n_e e A_{sda} \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{e(V_{sda} - \phi_p)}{kT_e} \right] \quad (3.3)$$

Onde a corrente de saturação de elétrons é,

$$I_{se} = n_e e A_{sda} \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

Extraindo-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação acima se obtém,

$$\ln(I_e) = \left(\frac{e}{kT_e} \right) V_{sda} + cte \quad (3.5)$$

Um gráfico de $\ln(I_e)$ versus V_{sda} resulta numa reta cujo coeficiente angular α é exatamente $e/kT_e = 1/T_e$, onde T_e é dado em unidades de eV ($1\text{eV} \approx 11600\text{K}$).

Outra maneira de determinar T_e é através de um “fitting” ou ajuste exponencial da curva I-V, e através da equação $y = a \cdot \exp(x/b) + c$, onde o parâmetro $b = T_e$.

Por outra parte, no método de Druyvesteyn calcula-se a função distribuição de energia dos elétrons, FDEE, utilizando a segunda derivada da corrente de elétrons em relação à tensão,

$$f_E(E)|_{E=e(V_p-V_{sda})} = \frac{4}{A_{sda}e} \left(\frac{m_e(V_p - V_{sda})}{2e} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e(V_{sda})}{dV_{sda}^2} \quad (3.6)$$

A existência de dois grupos de elétrons, ou seja, os elétrons de baixa energia e os elétrons de alta energia, requer o cálculo de uma temperatura eletrônica efetiva, T_{ef} . A integração da FDEE possibilita a obtenção dessa temperatura efetiva de elétrons $T_{ef} = 2/3 \langle E \rangle$, onde $\langle E \rangle$ representa a energia média dos elétrons:

$$\langle E[eV] \rangle = \frac{1}{n_e} \int_0^\infty E \cdot f_E(E) dE \quad (3.7)$$

No momento em que é obtida a temperatura dos elétrons, também, pode ser calculada a densidade dos elétrons pelos métodos mencionados acima como segue:

a) Procedimento de Langmuir e ajuste exponencial

$$n_e = \left(\frac{I_{se}}{eA_{sda}} \right) \left(\frac{2\pi m_e}{kT_e} \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

$$n_e[m^{-3}] = 3,73 \times 10^{13} \frac{I_{se}[A]}{A_{sda}[m^2] \sqrt{T_e[eV]}} \quad (3.9)$$

b) Procedimento de Druyvesteyn

$$n_e = \int_0^\infty f_E(E) dE \quad (3.10)$$

Adicionalmente, com os valores de temperatura de elétrons e densidade de elétrons estimados em cada método, finalmente, pode ser estimado o comprimento de Debye pela seguinte equação:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$\lambda_D [mm] = 7434 \left(\frac{T_e [eV]}{n_e [cm^{-3}]} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

3.2. Catodos testados

Os catodos estudados neste trabalho de mestrado foram fabricados com tubos de tântalo de 6,35 mm de diâmetro e 55 mm de comprimento. As ponteiros dos tubos foram fabricadas de tungstênio com orifícios centrais de 0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm. Como o diâmetro do orifício da ponteira é o parâmetro mais relevante neste estudo, a partir daqui os catodos serão catalogados conforme a seu diâmetro nessa ordem como, 5, 7 e 10, respectivamente. É de fundamental relevância mencionar, que tanto o corpo quanto o aquecedor circundante do catodo 7 foram fabricados pela Heat Wave Labs, HWL. Enquanto, os catodos 5 e 10 foram totalmente fabricados no LAP/CTE/INPE.

Prosseguindo, dentro dos tubos foram introduzidos insertos do tipo de folha de tântalo enrolada previamente recobertos com uma mistura de carbonatos. Nesse sentido, o recobrimento dos insertos foi realizado no LAP e empregaram a seguinte composição (GONÇALVES et al., 1998):

- a) Composição de carbonatos:** $BaCO_3 = 57,2\%$; $SrCO_3 = 38,8\%$; $CaCO_3 = 4\%$.
- b) Composição de fase líquida:** Acetato de amila = $14,4\%$; Álcool etílico = $22,9\%$; Nitrocelulose = $2,9\%$
- c) Conteúdo sólido = $27,7\%$**

As folhas de tântalo recobertas por esta solução tinham $25 \mu m$ de espessura, e foram enroladas conformando um tubo de multicamadas de aproximadamente

5,2 mm de diâmetro externo, 2 mm de diâmetro interno e 12,7 mm de comprimento.

Por outra parte, todos os eletrodos de vigia dos catodos ocos foram construídos no LAP com tubos de aço inoxidável 304, nos quais foram instaladas ponteiros de grafite de diferentes diâmetros de orifícios d_{o_pev} , conforme a Tabela 3.1. Nesta tabela, também, estão os dados da razão de área do orifício do inserto pela área do orifício da ponteira do catodo AR_1 , e a razão de área do orifício da ponteira do catodo pela área do orifício da ponteira do eletrodo de vigia AR_2 :

$$AR_1 = \frac{A_{o_i}}{A_{o_pc}} = \frac{d_{o_i}^2}{d_{o_pc}^2} \quad (3.13)$$

$$AR_2 = \frac{A_{o_pc}}{A_{o_pev}} = \frac{d_{o_pc}^2}{d_{o_pev}^2} \quad (3.14)$$

Ademais, o espaçamento entre o catodo e o eletrodo de vigia para todos os catodos foi de aproximadamente 0,6 mm.

Tabela 3.1- Relações geométricas dos catodos ocos testados, onde AR_1 é a razões de área do orifício do inserto pela área do orifício da ponteira do catodo, AR_2 é a razão de área do orifício da ponteira do catodo pela área do orifício da ponteira do eletrodo de vigia, d_{o_ev} é o diâmetro do orifício da ponteira do eletrodo de vigia, e os diâmetros dos orifícios das ponteiros dos catodos correspondem a suas denominações como 0,5 mm, 0,7 mm e 1 mm.

CATODO	d_{o_pev} (mm)	AR_1	AR_2
5	2	16	0,0625
	2,5	16	0,04
	3	16	0,027
7	2,5	8,1632	0,0784
10	3	4	0,11

Segundo a seção 2.3 e a Tabela 3.1, o catodo 5 tem uma configuração geométrica semelhante ao tipo A, enquanto, o catodo 7 tem uma configuração

geométrica semelhante ao tipo B, assim como, a configuração geométrica do catodo 10 aproxima-se mais ao tipo C.

Na Figura 3.10 é mostrado um desenho da estrutura do catodo 7 e na Figura 3.11 é ilustrada a estrutura dos catodos 5 e 10. Note-se que os catodos 5 e 10 representam uma evolução em projeto, pois apresentam dimensões menores e, portanto, são mais compactos que o catodo 7.

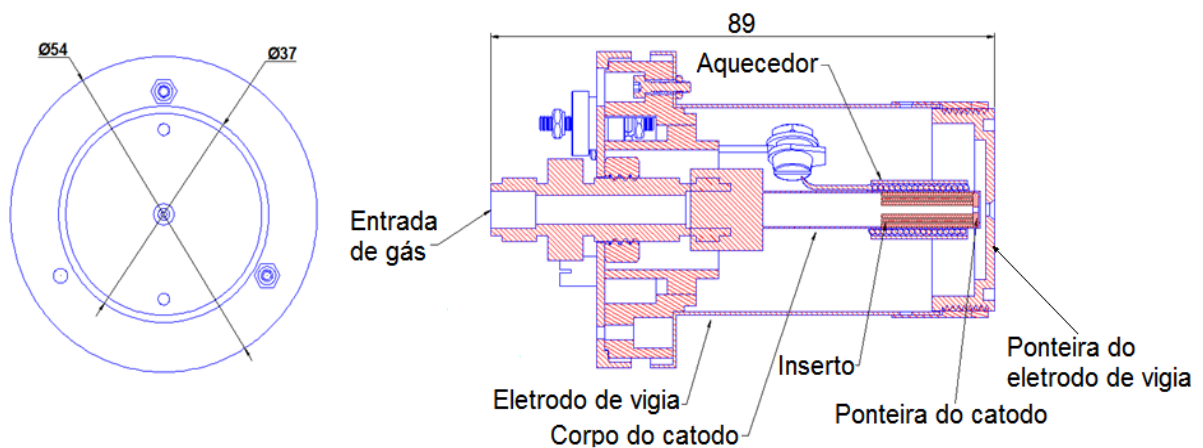


Figura 3.10- Desenho da estrutura do catodo 7, corpo e aquecedor da Heat Wave Labs e eletrodo de vigia do LAP.

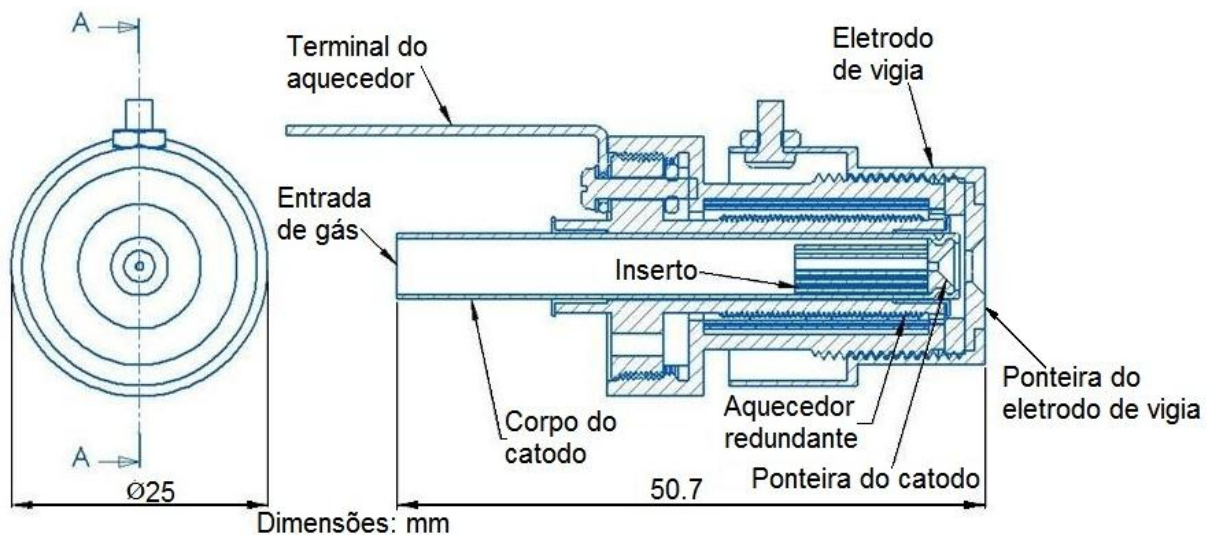


Figura 3.11- Desenho da estrutura dos catodos 10 e 5, corpos, aquecedores e eletrodos de vigia do LAP.

3.3. Procedimentos

Para uma ótima operação dos catodos ocos realizaram-se procedimentos de preparação por meio de um aquecimento. Estando devidamente aquecidos, foram executados os procedimentos de ignição em cada catodo. Em seguida, foram efetuados testes de variação de parâmetros operacionais para observar os regimes operacionais, e, por último, se realizou a medição dos parâmetros de plasma com a sonda de Langmuir simples.

Especificamente, para a preparação dos catodos para a ignição são três os procedimentos críticos, sendo eles, ativação, reativação e condicionamento. O condicionamento é sempre utilizado, mas a ativação e a reativação são feitas dependendo se o catodo é novo ou se fosse exposto no ar depois de operação. O condicionamento é um procedimento fundamental para aquecimento do catodo já que nele se fornece a energia térmica necessária para manter a emissão de elétrons prévia à ignição..

3.3.1. Preparação do catodo: ativação, reativação e condicionamento

É necessária uma preparação para ignição por meio de um aquecimento passo a passo, uma vez que um catodo precisa atingir uma temperatura adequada para começar os processos de emissão termiônica. Sem uma corrente de elétrons suficiente, o catodo simplesmente não poderá realizar a ignição. Nesse sentido, um inserto começa a emitir uma corrente de elétrons suficiente a aproximadamente 800°C.

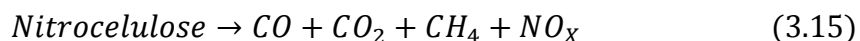
Quando o inserto é aquecido em vácuo, os componentes revestidos no inserto liberam o CO₂, deixando, por exemplo, uma mistura dos óxidos tais como BaO, SrO e CaO (FORRESTER, 1988). Nesse momento, toma lugar a ativação e a mistura torna-se um excelente emissor com densidades de corrente na ordem de 3 A/cm². Por outro lado, a mistura apresenta desvantagem porque é sensível a impurezas, especialmente o vapor de água. Com o devido cuidado, um catodo que foi aquecido e depois exposto somente a gases secos, depois da ativação, pode ser levado à pressão atmosférica e ainda funcionar quando

retornar às condições de vácuo. Casualmente, em tais catodos o inserto pode ser substituído por um outro novo uma vez verificado um dano irreversível que possa impossibilitar a emissão de elétrons.

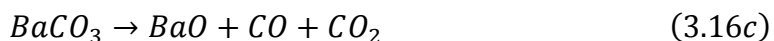
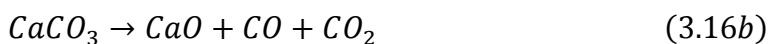
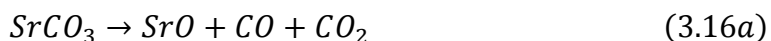
O aquecimento de cada catodo foi realizado aplicando-se uma corrente de aquecimento num intervalo de 1A/3min até 3 A, e logo de 0,5A/3min até atingir o limite entre 4 A a 7 A, dependendo do catodo (ver seção 3.3.1.3). Nos procedimentos de ativação e reativação, o espectrômetro de massa foi ligado para permitir a observação da variação dos componentes químicos residuais e expelidos pelo inserto. O espectrômetro de massas forneceu a medida dos componentes químicos em pressões parciais e em função do tempo.

3.3.1.1. Ativação

Na ativação do catodo, o aquecimento dos componentes que cobrem os insertos (mencionados na seção 3.2) produz um processo de conversão (GONÇALVES et al., 1998). O procedimento padrão para obter filmes óxidos é por meio da degradação térmica dos carbonatos e da nitrocelulose. Durante esse processo, grandes quantidades de gases orgânicos, tais como, CH₄, CO, CO₂ e inorgânicos tais como NO_x são desprendidos. A degradação da nitrocelulose torna-se como segue,



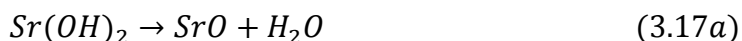
e a degradação dos carbonatos é,



3.3.1.2. Reativação

Como mencionado no inicio dessa seção, os catodos com insertos do tipo de folha de tântalo enrolada podem ter um comportamento critico quando são

expostos ao ar em pressão atmosférica. A mistura que reveste os insertos é à base de materiais hidrófilos que, em outras palavras, podem absorver facilmente humidade. Se o catodo for exposto no ar, os óxidos são convertidos em simples hidróxidos. Então, deve ser realizado um processo de reconversão de (Ba, Sr, Ca)(OH)₂ a (Ba, Sr, Ca)O (GONÇALVES et al., 1998), o qual ocorre como segue,



Nessa reconversão, o vapor de água é o principal produto da reação e pequenas quantidades de N₂, CO, CO₂ e N₂O₂ são também detectadas.

3.3.1.3. Condicionamento

Uma vez que o procedimento de ativação ou reativação foi efetuado num catodo oco, em seguida, pode ser realizado o procedimento de condicionamento. O procedimento de condicionamento envolve um aquecimento lento como o feito na ativação e reativação. No caso de já ter sido realizada a conversão ou reconversão dos componentes do inserto, não é necessário manter ligado o espectrômetro de massa e o único parâmetro a observar-se é a corrente de elétrons. Para isso, um multímetro foi conectado entre o eletrodo de vigia e sua fonte conforme esquema da Figura 3.5 (seção 3.1.2).

Os três fatores chave para um ótimo aquecimento dos catodos são a resistividade do aquecedor, o contato do inserto com a parede interna do corpo do catodo e o contato do aquecedor com corpo do catodo.

O catodo foi considerado adequadamente aquecido e em estado termalizado quando correntes de elétrons entre 1 e 10 miliamperes fossem coletadas pelo eletrodo de vigia já devidamente polarizado. Nesta situação a temperatura do catodo atingiu valores iguais ou maiores que 800°C e todo o seu copo exibiu

uma coloração avermelhada como mostrado na Figura 3.12. A comprovação de que os catodos atingiram tais temperaturas de termalização está detalhada na seção 4.1.3. Para que essa temperatura fosse atingida nos catodos, a corrente de aquecimento nos catodos foi até 4 A para o catodo 5, 7 A para o catodo 7 e 6 A para o catodo 10.

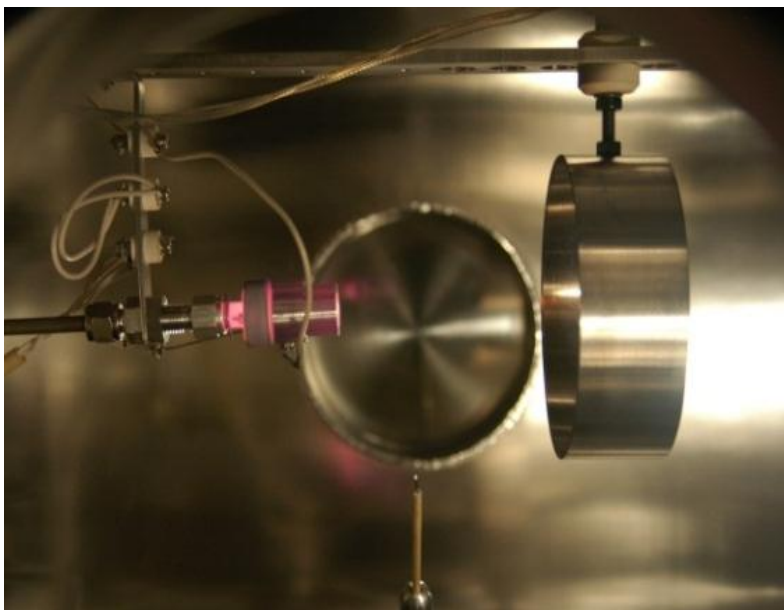


Figura 3.12- Fotografia de exemplo de aquecimento do catodo 10.

3.3.2. Ignição

Estando o catodo devidamente aquecido e termalizado o processo de ignição pode ser, então, iniciado. Neste momento um plasma começa a ser gerado através da colisão dos elétrons termiônicos com o vapor de bário metálico (proveniente da camada de carbonatos do inserto). Os elétrons termiônicos (elétrons primários) e os secundários (aqueles emitidos por colisões de íons com a superfície do catodo e os provenientes do gás ionizado) podem ser, então, coletados pelo eletrodo de vigia uma vez estabelecida a devida polarização elétrica. A corrente eletrônica coletada será maior ou menor em valor dependendo do diâmetro do orifício da ponteira do catodo.

Existem tensões mínimas no eletrodo de vigia, com as quais uma corrente de elétrons proveniente do catodo pode ser coletada, sendo elas, para os catodos 5, 7 e 10 de 300, 70 e 40 V, respectivamente. Estas tensões proporcionam as

correntes de elétrons mínimas para que o processo de ignição seja bem sucedido. A ignição pode ser realizada, finalmente, por dois métodos sendo eles por pulso de gás ou por tensão no eletrodo de vigia, dependendo de diversos fatores, tais como, o condicionamento do inserto, fatores geométricos dos catodos e do tipo de gás.

No pulso de gás, o eletrodo de vigia permanece polarizado e em seguida a válvula de admissão de gás é rapidamente aberta, uma vez previamente estabelecida uma dada vazão mássica. Dessa forma, um jato de plasma sai do catodo, gerando luminosidade entre o catodo e o anodo conforme a Figura 3.13. A desvantagem desse método é que materiais do corpo do catodo e do inserto podem ser ejetados junto com a pluma de plasma, danificando o catodo como um todo.

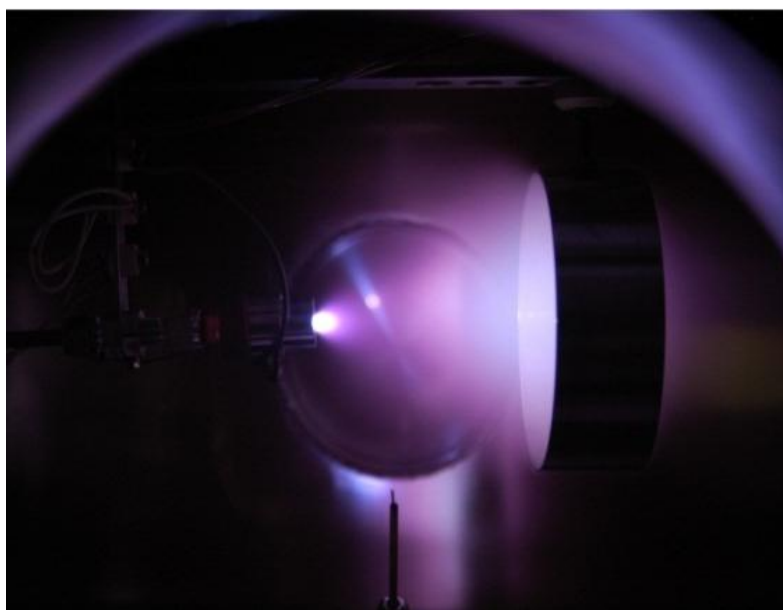


Figura 3.13- Fotografia de exemplo de ignição do catodo 10.

Por outro lado, no método por tensão, quando uma corrente de elétrons com valor adequado é detectada pelo eletrodo de vigia, a sua polarização é desligada. O passo a seguir é fornecer uma baixa vazão mássica de gás e, finalmente, alimentar o eletrodo de vigia com uma tensão o que resultará, também, no jato de plasma similar a Figura 3.13. Neste caso as ejeções de

material do catodo são dificilmente observadas (a não ser estando o catodo alimentado com altas vazões mássicas).

É preciso considerar que neste estudo, o método de ignição por tensão foi o método mais apropriado para evitar danos aos catodos. Adicionalmente, independente do método efetuado para ignição, em um dado catodo depois de realizar-se sua ignição, o aquecedor deve ser desligado imediatamente, evitando o superaquecimento do inserto, e neste momento o catodo se mantém em regime de descarga autossustentável. Na descarga autossustentável, o aquecimento é mantido pelo impacto iônico na superfície do catodo.

3.4. Circuitos elétricos de corrente de descarga e regimes de operação de descarga

Os circuitos elétricos de corrente de descarga são referidos neste trabalho como aqueles nos quais um eletrodo (anodo ou eletrodo de vigia ou ambos) está coletando a corrente de elétrons emitida pelo catodo, conforme mostra a Figura 1.2 e foi explicado na seção 1.3.

Por outra parte, nos catodos ocos foram observados três tipos de regimes de operação de descarga, conhecidos como pluma, difusivo e pontual. Esses modos de descarga foram obtidos pelo procedimento de variação dos parâmetros operacionais, tais como vazão mássica, corrente e tensão de descarga, que ao mesmo tempo influenciaram as curvas características V-I em diferentes condições de descarga. Os resultados dos modos de descarga nos catodos 5, 7 e 10 serão expostos na seção 4.2.

3.5. Medição

Para medição das curvas características I-V de sonda eletrostática foram escolhidas condições nas quais os catodos encontravam-se com descargas estáveis, mesmo havendo ainda um pouco de ruído na descarga nos casos de maior tensão de descarga. Todas as condições dos testes realizados neste estudo estão descritas no anexo A através das Figuras A.1, A.2 e A.3.

Para uma tomada de medidas, a sonda foi exposta ao plasma e polarizada conforme o mencionado na seção 3.1.2. Posteriormente, as curvas obtidas precisaram de uma correção devido ao ruído presente no circuito da sonda. A correção correspondeu à subtração da curva de ruído da curva original medida. A curva de ruído foi obtida tendo desligadas todas as fontes de tensão, e, subsequentemente, realizando uma rampa de tensão com a qual se obteve uma curva característica I-V como a observada em vermelho na Figura 3.14. Na Figura 3.14, também está ilustrada a curva original em preto e a curva corrigida em azul. A curva corrigida em azul foi pós-processada para estimativa dos parâmetros de plasma. Como as curvas foram medidas localizando a sonda em diferentes distâncias axiais com respeito à superfície do eletrodo de vigia (conforme Figura 3.1), foi possível obter um perfil de cada parâmetro de plasma ao longo da região da pluma de plasma do catodo. Esse foi o fundamento desse estudo para determinar o desempenho dos catodos testados.

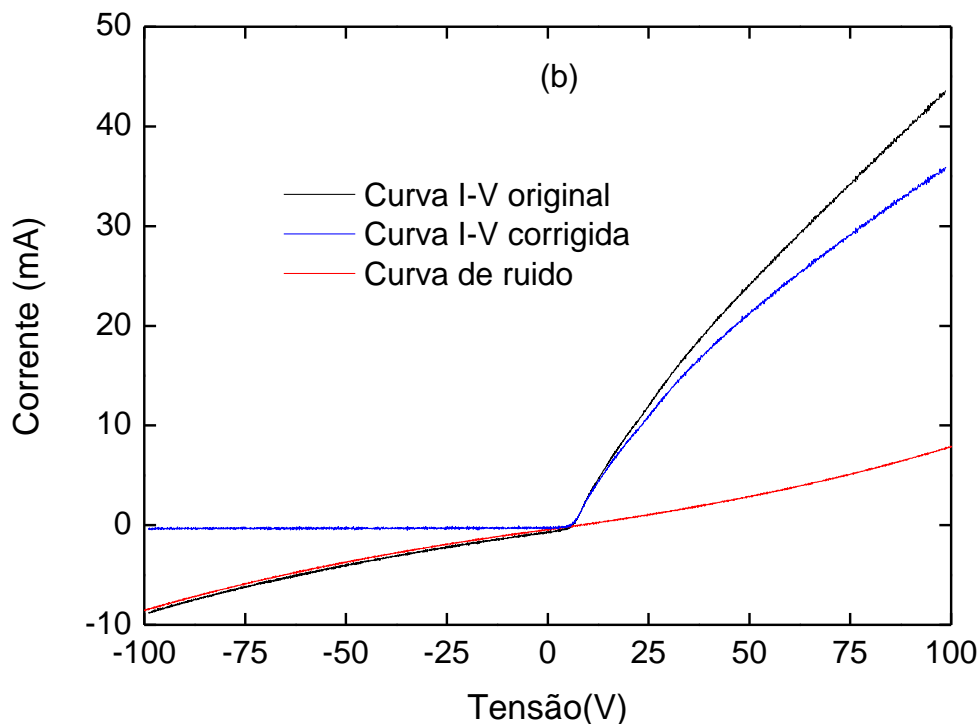


Figura 3.14- Correção da curva característica I-V de sonda de Langmuir cilíndrica simples.

Adicionalmente, as medições nos catodos foram feitas até uma distância axial máxima, na qual, uma mínima corrente de elétrons poderia ser analisada pelo algoritmo de pós-processamento. No catodo 5, a mínima corrente possível de ser analisada pelo algoritmo de pós-processamento foi detectada a uma distância de 20 mm da superfície do eletrodo de vigia para argônio no modo pluma e pontual e para todas as correntes de descarga e vazões mássicas. Já para xenônio essa mínima corrente ocorreu a uma distância de 50 mm no modo pluma, transição e pontual para todas as correntes de descarga e vazões mássicas.

Por outro lado, no catodo 7 a mínima corrente possível de ser analisada pelo algoritmo de pós-processamento foi detectada a uma distância de 50 mm da superfície do eletrodo de vigia, tanto para o argônio, bem como para o xenônio, estando o catodo operando em regime de pluma. Para os modos transição e pontual e o catodo operando com xenônio, a mínima corrente analisável ocorreu para uma distância de 80 mm do catodo. É de se ressaltar que as medições em ambos os modos transição e pontual foram realizadas a partir de uma distância mínima de 20 mm. A razão disso é que para distâncias menores a corrente medida foi muito alta e ultrapassava o limite de 1A da fonte de tensão de alimentação da sonda e, também, para correntes maiores a sonda poderia ser danificada por superaquecimento.

Por ultimo, no catodo 10, a mínima corrente possível de ser analisada pelo algoritmo de pós-processamento foi detectada a uma distância de 30 mm para argônio e 50 mm para xenônio. Conforme o esquema da Figura A.3, do Anexo A, o catodo 10 operou somente no modo pluma.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os primeiros resultados descrevem como foi a preparação dos catodos por meio do aquecimento. Em seguida, são apresentados os resultados dos procedimentos de ignição. Logo após, os resultados da variação de parâmetros operacionais que forneceram as condições de operação nos regimes atingidos pelos catodos. Finalmente, são descritos os resultados dos perfis dos parâmetros de plasma para avaliar o desempenho dos catodos.

4.1. Resultados dos procedimentos

4.1.1. Ativação

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 estão ilustrados os gráficos das pressões parciais dos componentes liberados em função ao tempo de aquecimento para ativação dos catodos 5, 7 e 10, respectivamente. A equação 3.15 do capítulo 3 representa os picos A dos gráficos de ativação, ou seja, a decomposição da nitrocelulose. As equações 3.16a, 3.16b e 3.16c, são representadas pelos picos B, C e D dos mesmos gráficos e representam a degradação dos carbonatos.

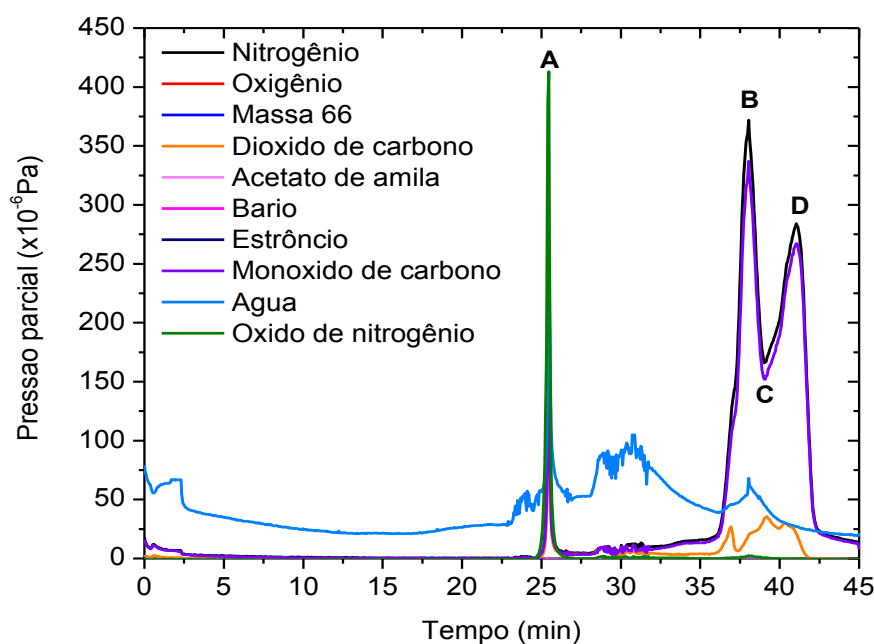


Figura 4.1- Ativação do catodo 5, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).

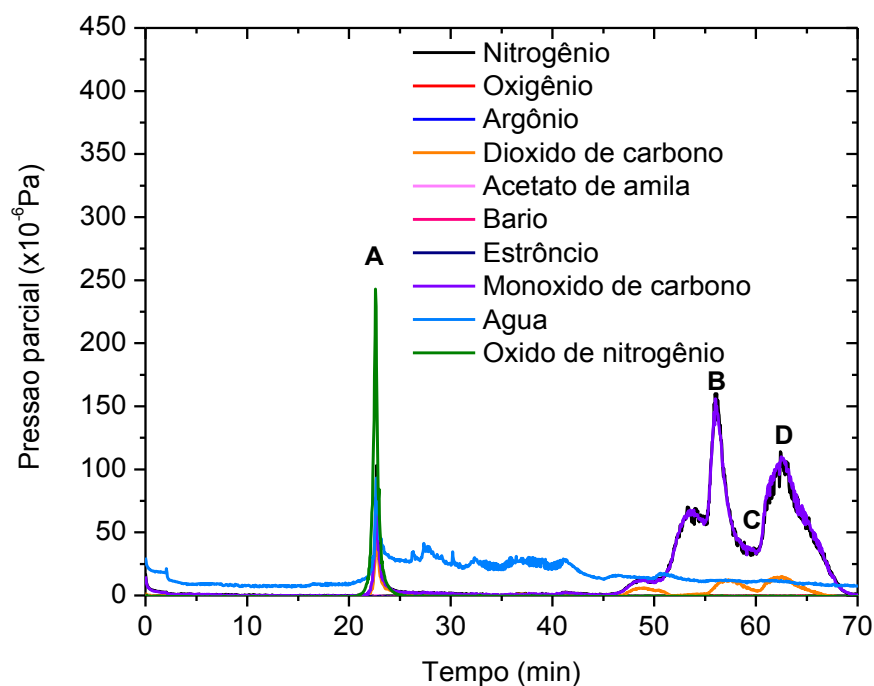


Figura 4.2- Ativação do catodo 7, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).

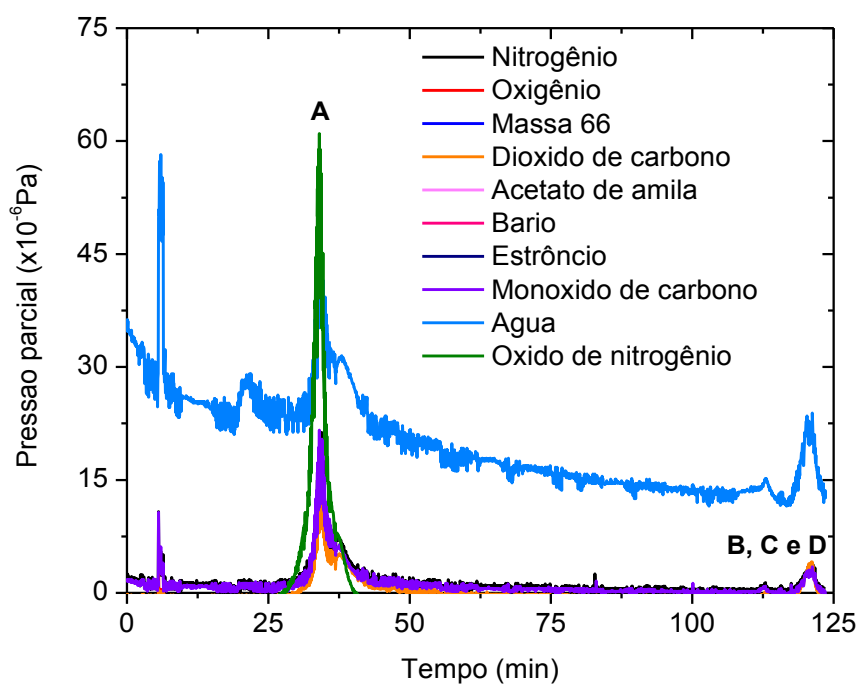


Figura 4.3- Ativação do catodo 10, decomposição da nitrocelulose (A) e degradação dos carbonatos (B, C e D).

Como pode ser observado nestes gráficos, o processo de decomposição da nitrocelulose ocorrem em torno dos 25 min para todos os catodos que foram

testados. Mas, tais picos apresentaram diferentes valores de pressão parcial dos componentes conforme cada catodo. Possivelmente, o fator que pode causar tais diferenças de pressão parcial dos picos A, B, C e D é o aquecedor, pois não podemos deixar de lembrar que os aquecedores usados foram diferentes, já que o catodo 7 utilizou um aquecedor comercial da empresa HWL e os aquecedores dos catodos 5 e 10 foram feitos no LAP. Para cada catodo do LAP foi instalado o mesmo modelo de aquecedor, no entanto, notou-se que, em uma determinada situação, houve um mau contato da extremidade de aterramento do filamento aquecedor com o corpo do catodo. Comparando os gráficos de ativação, observa-se que o catodo 5 apresentou os picos A, B, C e D de maior intensidade em comparação aos picos dos outros catodos (7 e 10), pelo qual, se percebe que foi o de melhor contato do aquecedor com corpo do catodo. Além disso, os picos B, C e D da degradação dos carbonatos apresentou-se em menor tempo no catodo 5 que nos outros catodos. Ao contrário, no catodo 10 o pico B de degradação dos carbonatos levou muito mais tempo que os outros catodos, e teve um pico A de decomposição da nitrocelulose menor. Na seção 4.1.3 será descrito o comportamento dos catodos e seus filamentos aquecedores.

Por outro lado, segundo estudos realizados por Gonçalves et al. (1998) os picos que representam a degradação da nitrocelulose ocorrem a temperatura de aproximadamente 172°C e os picos que representam a degradação dos carbonatos tais como o óxido de estrôncio, óxido de cálcio e óxido de bário ocorrem com temperaturas de 607°C, 714°C e 827°C, respectivamente.

4.1.2. Reativação

Por razão de manutenção do aparato experimental, os catodos 5 e 7 foram expostos ao ar após ativação. Como estão ilustrados nas Figuras 4.4(a) e (b), os picos de água no caso de aquecimento para reativação estão representados pelo ponto A. Nestas figuras, observa-se que os picos de água para os catodos 5 e 7 ocorreram 20 minutos depois que o aquecimento foi iniciado. Procura-se que a água saia lentamente do catodo como o caso observado na Figura 4.4(a). Uma saída brusca de vapor de água, como no caso da Figura 4.4(b),

pode causar o desprendimento das camadas da mistura de óxidos que reveste o inserto. Como consequência, as partes desprendidas podem, por exemplo, obstruir o orifício da ponteira dos catodos e, além disso, diminuir a vida útil dos catodos.

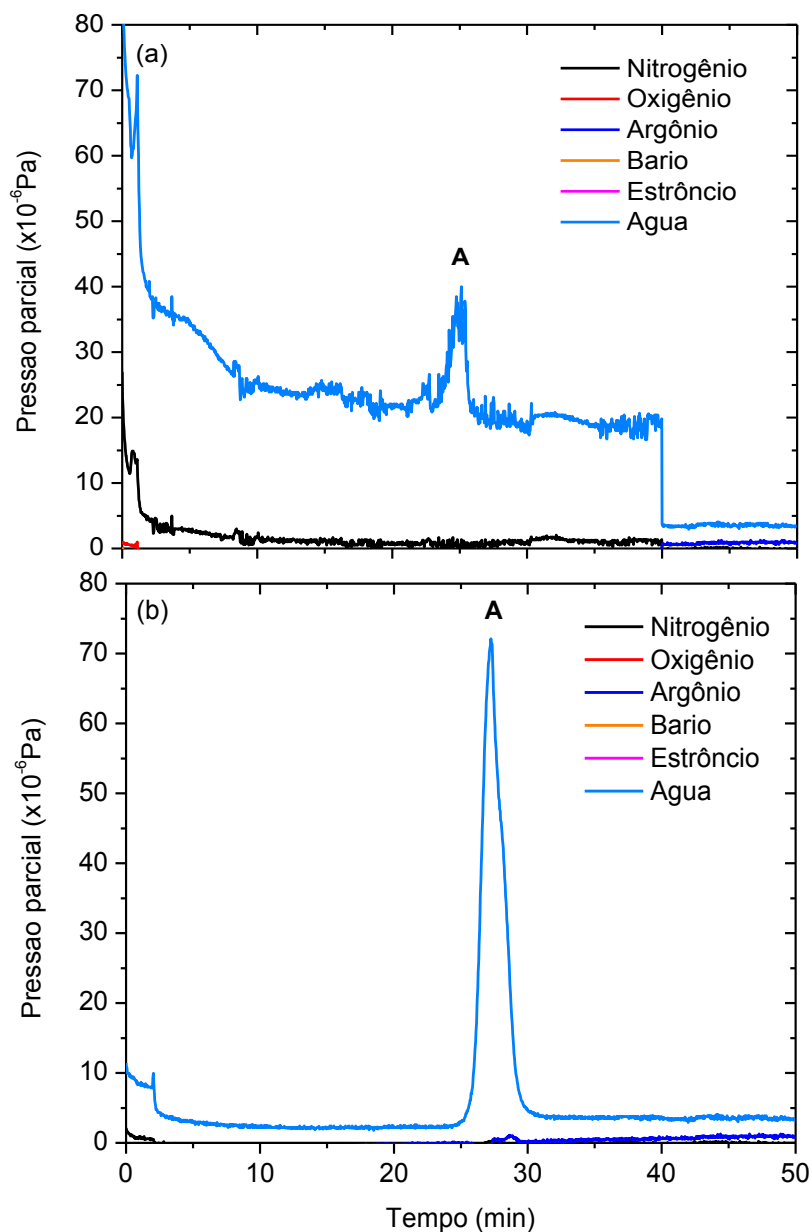


Figura 4.4- Reativação dos catodos: catodo 5 (a) e catodo 7 (b).

O tempo de exposição dos catodos 5 e 7 ao ar foi de aproximadamente 1 a 1:30 horas, e, em particular, os catodos foram expostos à condições atmosféricas de baixa umidade relativa (<60%). Note-se que depois dos

procedimentos de ativação e reativação os catodos foram condicionados conforme procedimento de condicionamento descrito na subseção 3.3.1.3, deixando-os por um tempo adequado para prosseguir com os processos de ignição.

Para concluir com os dois procedimentos de ativação e reativação, é interessante acrescentar ainda que os picos antes de 5 minutos de coleta de dados, ilustrados nos gráficos do espectrômetro de massa, representam o momento da abertura da válvula gaveta para a medição com o espectrômetro.

4.1.3. Condicionamento

A potência de aquecimento dos catodos aumenta ao longo do tempo de aquecimento requerido para ignição, conforme a proporcionalidade entre a corrente e tensão de aquecimento (equação 3.22). Em virtude do que foi mencionado, na Figura 4.5 estão mostradas curvas típicas da variação de potência de aquecimento com respeito ao tempo de aquecimento, de um procedimento de condicionamento típico para cada catodo testado (5, 7 e 10, respectivamente).

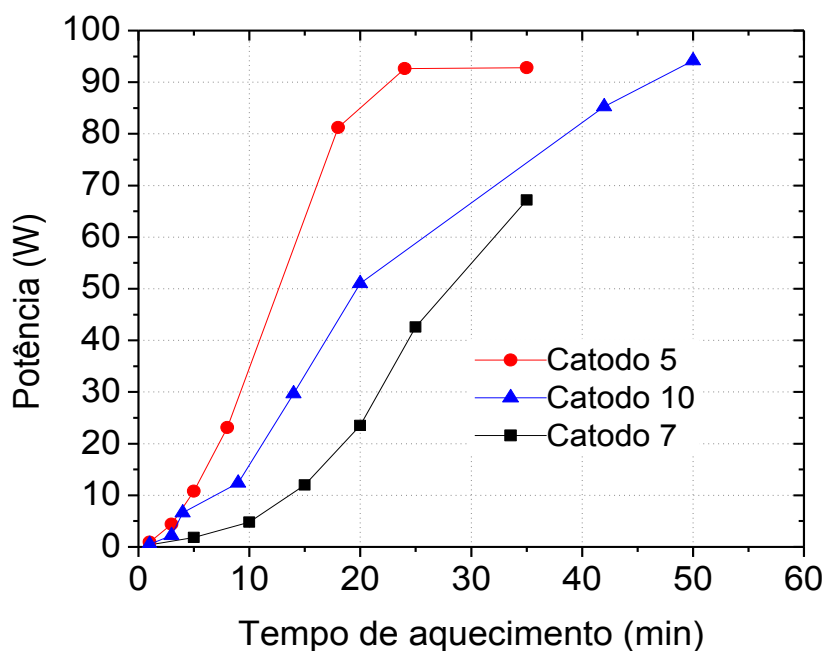


Figura 4.5- Exemplo da potência de aquecimento para ignição em função do tempo de aquecimento requerido para condicionamento dos catodos 5, 7 e 10, respectivamente.

A diferença entre as curvas de potência de aquecimento dos catodos (Figura 4.5) é causada em primeiro lugar pelo material do filamento aquecedor. Os filamentos aquecedores dos catodos 5 e 10 foram confeccionados no LAP com tungstênio, enquanto, o aquecedor do catodo 7 da HWL foi confeccionado de tântalo como mencionado na seção 3.3.1.3. As propriedades elétricas dos filamentos aquecedores de cada catodo a 20 °C estão listados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1- Propriedades elétricas a 20°C dos filamentos aquecedores dos catodos 5, 7 e 10.

Catodo	Material	$R_0 (\Omega)$	$\alpha_M (^\circ\text{C}^{-1})$
5	Tungstênio	0,85	0,0045
7	Tântalo	0,38	0,0038
10	Tungstênio	0,95	0,0045

Como observado na Tabela 4.1 os catodos 5 e 10 utilizaram aquecedores com filamentos do mesmo material (Tungstênio), a diferença entre as suas resistências iniciais a 20°C pode ser atribuída ao contato elétrico entre a extremidade de aterramento do filamento com o corpo do catodo, sendo que no catodo 10 este contato foi muito pobre. De modo geral, as diferenças entre os valores das resistências iniciais dos aquecedores, dos catodos que empregaram tântalo ou tungstênio, se deve tanto aos diferentes comprimentos, bem como, às diferentes resistividades de cada material empregado nos filamentos aquecedores. Outro fator que pode ter influenciado na diferença de potência e tempo de aquecimento dos catodos, foi o contato térmico entre inserto e a parede interna do corpo do catodo.

Prosseguindo, como mencionado na seção 3.3.1.3, a resistência de um material varia com a temperatura, isso também está mostrado na Figura 4.7 para os filamentos aquecedores dos catodos 5, 7 e 10, respectivamente, e tais resistências foram estimadas aplicando-se a equação 3.21.

Finalmente, na Tabela 4.2 estão mostrados os valores médios dos filamentos aquecedores para as condições de termalização de cada catodo, ou seja, no condicionamento prévio a realizar-se a ignição. Pode-se observar que o

aquecimento dos catodos do LAP tem temperaturas de aquecimento, pelo menos no filamento aquecedor, superiores que o catodo comercial da HWL quando o catodo encontra-se em condições totalmente adequadas como o caso do catodo 5, isso é uma vantagem para a realização da ativação em um menor tempo. Do mesmo modo, se requiere menor potência de aquecimento no catodo 05 para obter temperaturas similares a dos catodos 7 e 10, mas, o mais provável é que se precise de mais tempo de aquecimento. Por último, segundo os valores médios de temperaturas de aquecimento do filamento aquecedor, observa-se que os catodos podem ser condicionados para a ignição com temperaturas menores aos 800 °C e baixas potências, como é o caso dos catodos 07 e 05.

Tabela 4.2- Valores médios de aquecimento para a condição de termalização (na temperatura máxima de aquecimento do filamento) dos catodos 5, 7 e 10.

Catodo	I_{Aqu} (A)	P_{Aqu} (W)	T (°C)	Tempo (min)
5	4,11	92,8	1450,1	41,6
7	7	65,8	652	42,8
10	6,2	64,1	411,7	31,4

4.1.4. Ignição

Na Figura 4.6 estão mostradas as curvas típicas de corrente de emissão com respeito ao tempo de termalização para os catodos 5, 7 e 10, respectivamente. Essa Figura é o caso onde cada catodo atingiu sua corrente de emissão máxima.

Na Figura 4.6 observa-se que as correntes de emissão nos catodo 10 e 07 foram maiores que no catodo 05, também o seus valores máximos ocorreram em um menor tempo e aplicando-se menor tensão no eletrodo de vigia, uma causa muito provável disso é a influência dos diferentes diâmetros dos orifícios das ponteiros dos catodos. Por exemplo, para o catodo 10 a área de penetração de campo elétrico é mais efetiva em comparação aos outros catodos 5 e 07, em outras palavras, o campo elétrico possui dificuldade em

penetrar catodos com pequenos diâmetros de orifício da ponteira, o que faz requerer maior tensão para estabelecer um campo elétrico capaz de extrair uma corrente de elétrons suficiente para a ignição. Para menores diâmetros de orifícios de ponteira, a parede interna da ponteira do catodo é uma barreira física para atrair os elétrons ao eletrodo de vigia e também o orifício representa uma pequena área de extração dos elétrons, o que impede que tais sejam facilmente direcionados para o eletrodo de vigia.

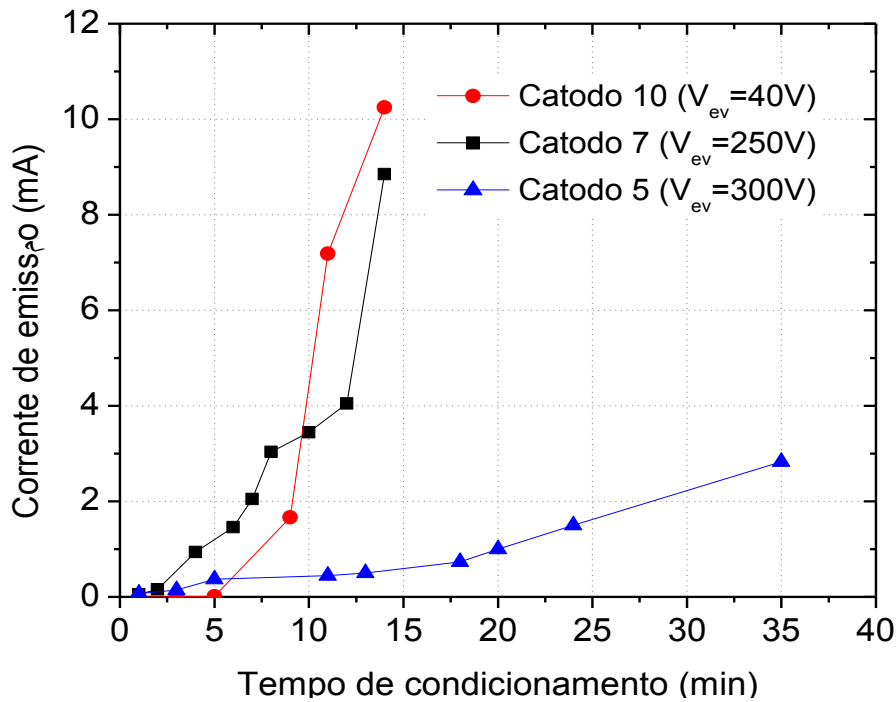


Figura 4.6- Correntes de emissão máximas em função do tempo de aquecimento dos catodos 5, 7 e 10.

Por outro parte, exemplos dos parâmetros de ignição para os diferentes procedimentos realizados nos catodos 5, 7 e 10, estão descritos nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Nessas tabelas, pode-se observar, por exemplo, que a tensão mínima de ignição para o catodo 05 foi de 300 V, enquanto para o catodo 7 foi de 70 V e para o catodo 10 foi de 40 V. Essas tensões também foram as tensões de ruptura de gás, e praticamente para vários procedimentos de ignição $(V_{Bk})_{catodo\ 05} > (V_{Bk})_{catodo\ 07} > (V_{Bk})_{catodo\ 10}$. Além disso, elevados valores nas correntes de emissão foram observadas para os catodos 10 e 7 que para o catodo 5, ou seja,

$(I_{ev,ign})_{catodo\ 10} \geq (I_{ev,ign})_{catodo\ 07} \gg (I_{ev,ign})_{catodo\ 05}$. Por esses dois parâmetros, pode-se concluir que o catodo 10 teve melhores características de ignição que os catodos 5 e 7.

Tabela 4.3- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 5.

Gás	$I_{ev,ign}$ (mA)	$V_{ev,ign}$ (V)	\dot{m}_{ign} ($\mu\text{g/s}$)
Xe	2,83	300	176,4
	2	350	392
	0,5	350	392
	0,42	350	392
Ar	0,39	350	87

Tabela 4.4- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 7.

Gás	$I_{ev,ign}$ (mA)	$V_{ev,ign}$ (V)	\dot{m}_{ign} ($\mu\text{g/s}$)
Xe	8,85	250	196
	4,29	200	147
	2,78	150	73,5
	2,21	101	57,82
	0,83	80	49
	1	250	197,96
Ar	0,84	70	87
	0,96	200	87
	0,25	150	87

Tabela 4.5- Exemplo dos parâmetros de ignição para diferentes procedimentos de ignição realizados ao catodo 10.

Gás	$I_{ev,ign}$ (mA)	$V_{ev,ign}$ (V)	\dot{m}_{ign} ($\mu\text{g/s}$)
Xe	7,41	40	294
	10	40	294
Ar	0,72	150	348

Prosseguindo, a exceção do teste do catodo 10 com argônio (Tabela 4.5), a ignição dos catodos 5, 7 e 10 se realizou com vazões mássicas menores ou iguais a 87 $\mu\text{g/s}$. No caso especial do teste realizado com argônio no catodo 10,

o contato elétrico do filamento aquecedor se degradou a tal ponto, que a corrente de emissão necessária para a ignição foi reduzida de 10 mA a 720 μ A. Por essa razão, foi também necessário aumentar a tensão de ignição de 40 V a 150 V, e suministrar uma maior vazão mássica (348 μ g/s), para a ignição com argônio. Apesar de que o catodo 10 descreveu em poucos testes melhores características de ignição, o contato de filamento aquecedor com o corpo do catodo dificultou o teste com argônio. Testes futuros poderiam corroborar a facilidade na ignição de catodos com configuração geometria semelhante a do catodo 10, a qual é similar a tipo C citada nesse trabalho na seção 2.4.3.

Para finalizar esta seção, é interessante ressaltar que o tipo de ignição mais favorável para os catodos foi a de tensão no eletrodo de vigia, já que nesse caso não foram observadas centelhas, as quais são pequenos fragmentos desprendidos do catodo. Isso foi observado com o método de ignição por pulso de gás, já que o fluxo de gás frio que entra a alta velocidade no catodo pode desprender facilmente o material recoberto do inserto, o metal do inserto e, além disso, danificar outras partes do catodo.

4.2. Modos de descarga

A variação manual dos parâmetros operacionais tais como vazão mássica e corrente de descarga, mudou a tensão da descarga. Os três parâmetros mencionados foram primordiais para que os modos de descarga fossem atingidos e para realização das curvas características V-I de descarga dos catodos. Os três modos atingidos pelos catodos do LAP foram difusivo, pluma e pontual como está ilustrado na Figura 4.7. As transições apresentaram-se nos limites entre os modos, onde usualmente altas amplitudes e frequências na oscilação do plasma foram observadas, antes de estabelecer-se um modo. Os modos foram catalogados por observação visual e pela tensão de descarga estabelecida para uma corrente de descarga e vazões mássicas específicas, já que existem na literatura estudos que confirmam tal comportamento (SAKAI et al., 2007).

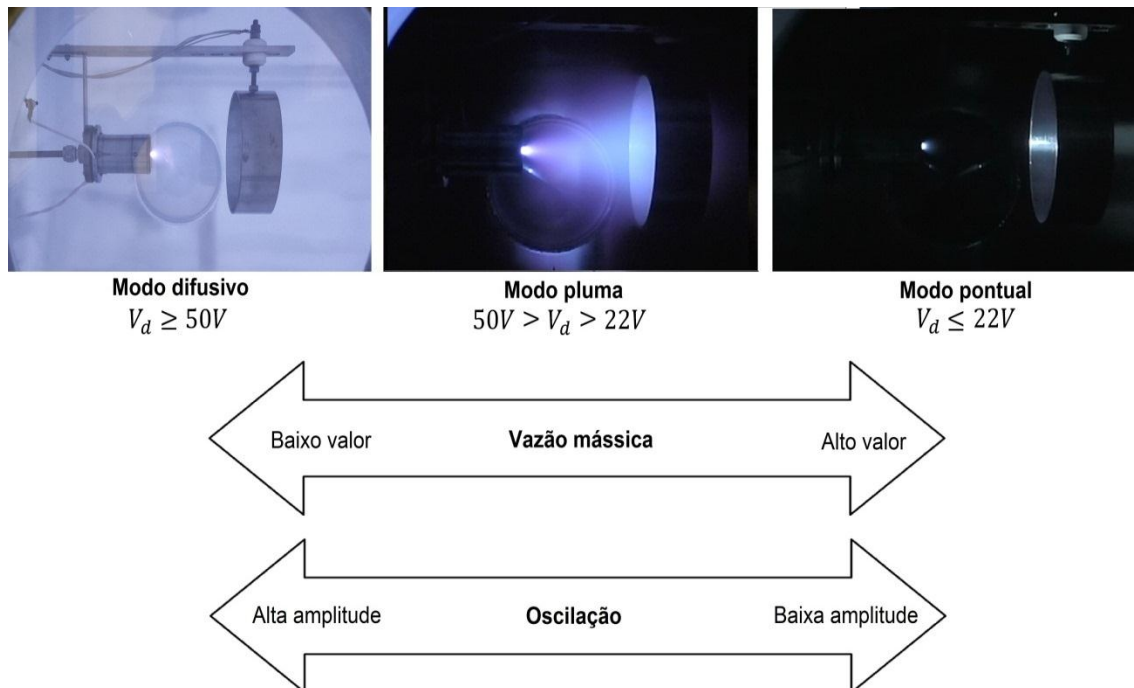


Figura 4.7 -Esquema dos modos de operação e seus parâmetros.

De forma geral, a tensão de descarga V_d foi característica para cada modo de operação, sendo ela $(V_d)_{M.difusivo} \gg (V_d)_{M.pluma} \gg (V_d)_{M.pontual}$ (Figura 4.7). Em vista disso, o modo pontual foi atingido para elevados valores de vazão mássica e tipicamente para alta corrente de descarga. O modo difusivo foi observado para todos os catodos com vazões mássicas menores ou iguais a $588 \mu\text{g/s}$ e vários valores de corrente de descarga (entre 1 e 9 A dependendo do catodo). Alta amplitude e frequência de oscilação foram observadas visualmente no modo difusivo e pluma, sendo mais intensas no primeiro modo mencionado. No modo pontual não se observaram oscilações no plasma.

4.2.1. Resultados com xenônio

Os resultados mais interessantes foram observados com o gás xenônio, pois pela primeira vez no LAP puderam ser bem diferenciados os diferentes modos de operação. Os testes descritos a seguir, correspondem aos catodos 5, 7 e 10 operando em circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo.

4.2.1.1. Catodo 5

Os testes no catodo 5 com xenônio foram realizados com três diferentes diâmetros de orifício da ponteira do eletrodo de vigia, ou seja, com 2, 2,5 e 3 mm (conforme a Tabela 3.1). Para os diâmetros de 2 e 2,5 mm o catodo atingiu o modo difusivo e pluma. Mas, nesses casos, para correntes maiores de 3 A foi observado um superaquecimento na ponteira do eletrodo de vigia. Isso aconteceu porque o eletrodo estava drenando muita corrente de descarga e como consequência altas tensões de descarga foram observadas. Ao trocar a ponteira com orifício do eletrodo de vigia por uma com maior diâmetro, de 3 mm, a corrente de descarga podia ser regulada a valores maiores que 3 A sem que o eletrodo de vigia mostrasse superaquecimento ou altas tensões de descarga. Levando-se em consideração esses aspectos, foi percebido que o diâmetro do orifício do eletrodo de vigia tem um papel fundamental para a operação de um catodo oco nos diferentes modos de descarga.

Com a nova ponteira de eletrodo de vigia (de 3 mm de diâmetro de orifício), os três modos de descarga foram observados para esse catodo e estão mostrados na sequência da Figura 4.8, os quais serão descritos a seguir.

O modo difusivo foi atingido só pra uma vazão mássica de 392 $\mu\text{g/s}$ com 2 A de corrente de descarga, nessas condições a tensão de descarga foi de 55 V. Outros testes não foram possíveis porque não foi produzida uma descarga estável. Por outro lado, o modo pluma foi atingido para vazões mássicas entre 392 $\mu\text{g/s}$ a 1,47 mg/s. Os testes foram realizados regulando a vazão mássica e aumentando a corrente de descarga. Para vazões mássicas maiores a 1,37 mg/s e com aumento da corrente de descarga, o catodo permaneceu em modo pluma. Um caso especial aconteceu a 1,470 mg/s, estando em modo pluma e com 8 A de corrente de descarga, a corrente de descarga foi, então, diminuída para 7A, nessa condição o catodo atingiu o modo pontual e permaneceu neste regime, mesmo com baixas correntes de descarga (inferiores aos 7 A). Depois a vazão mássica foi alterada para 1,37 e 1,57 mg/s, e o modo pontual foi mantido para ambas as vazões mássicas e com correntes de descarga entre 3 e 7 A.



Figura 4.8- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas, com gás xenônio para o catodo 5, caso de vazões mássicas de 490 µg/s a 1,37 mg/s.

Tendo em vista os aspectos observados, um fenômeno de histerese ocorre para vazões mássicas entre 1,37 e 1,57 mg/s, porque o modo pontual foi mantido independente da corrente aplicada (entre 3 e 7 A): quando a corrente é aumentada são observados diferentes valores de tensão de descarga que quando a corrente é diminuída para mesmos valores de corrente anteriores, ou seja, não existe linearidade. Para tais casos, não existiu uma transição com oscilação do modo pluma a pontual, a mudança de modo foi direta. Na Figura 4.9 estão às curvas características V-I de modos de descarga, para diferentes vazões mássicas testadas no catodo 5.

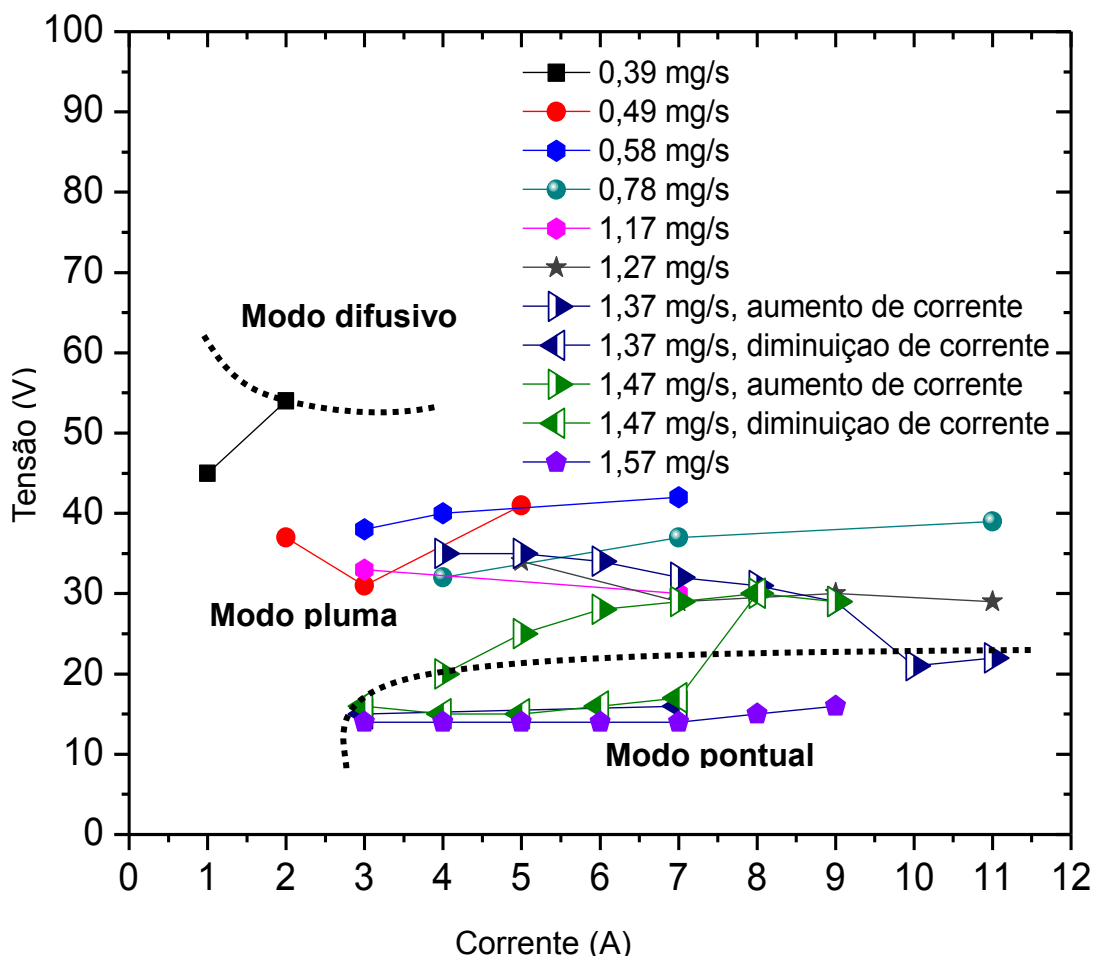


Figura 4.9- Curvas características V-I de descarga do catodo 5, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).

É preciso considerar, que para atingir-se o modo pontual com xenônio no catodo 5 foi necessária maior vazão mássica que no caso do catodo 7. Enquanto, o catodo 7 atingiu o modo pontual com 784 $\mu\text{g/s}$ e com correntes de descarga maiores a 9 A, como será descrito na seguinte seção, no catodo 05 o modo pontual foi atingido com 1,37 mg/s e permaneceu nesse modo com correntes de descarga entre 3 e 7 A.

4.2.1.2. Catodo 7

Inicialmente, o modo pluma foi estabelecido com baixa vazão mássica (cerca de 294 $\mu\text{g/s}$) conforme o procedimento de ignição descrito na seção 3.3.2 e a

Tabela 4.4. Logo, neste catodo foram realizados testes com vazões mássicas menores que 588 $\mu\text{g/s}$ e a corrente de descarga foi aumentada de 1 em 1 A até aproximadamente 5 A, conforme a Figura 4.10. O aumento da corrente de descarga nesse caso resultou no aumento da tensão de descarga. Consequentemente, o modo difusivo foi atingido para correntes de descarga maiores que 4 A. Prosseguindo, a corrente de descarga foi reduzida a 2 A e o modo pluma foi restabelecido. Em seguida, a vazão mássica foi aumentada para valores maiores que 588 até 784 $\mu\text{g/s}$ conforme a Figura 4.11, sequência 1 a 3. Para esses valores de vazão mássica a corrente de descarga foi variada entre 2 e 8 A, permanecendo no modo pluma.

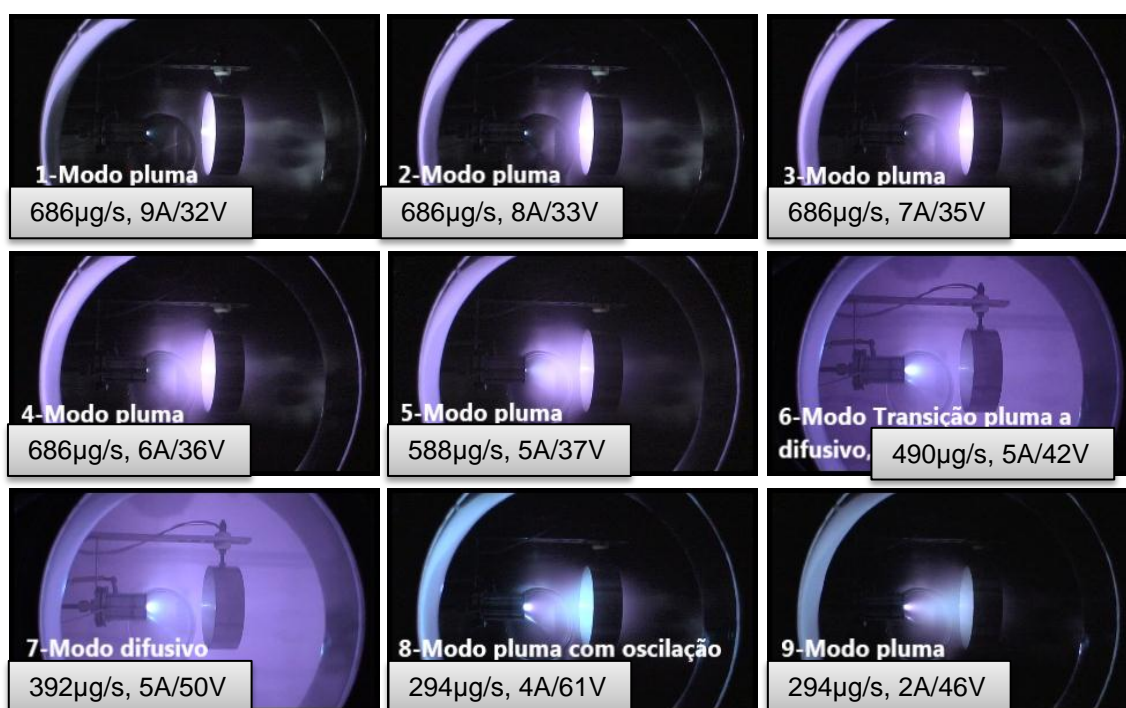


Figura 4.10- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas menores a 7 sccm, com gás xenônio para o catodo 7.

Um exemplo das transições apresentadas com vazão mássica de 8 sccm está ilustrado na sequência 4 e 5 da Figura 4.11. As transições apresentadas entre os modos de descarga apresentaram alta amplitude e alta frequência de oscilação do plasma. Na Figura 4.13, o modo de transição difusiva se deu previamente a um modo pluma bem estável, que é o observado antes de atingir-se o modo pontual no catodo 7. No modo pontual o plasma é estável e

sem oscilações em comparação aos outros modos. Com uma vazão mássica de 686 $\mu\text{g/s}$ o modo pontual foi atingido com uma corrente de 11 A. Com vazões mássicas entre 784 e 980 $\mu\text{g/s}$, o modo pontual foi atingido com correntes superiores a 9 A.

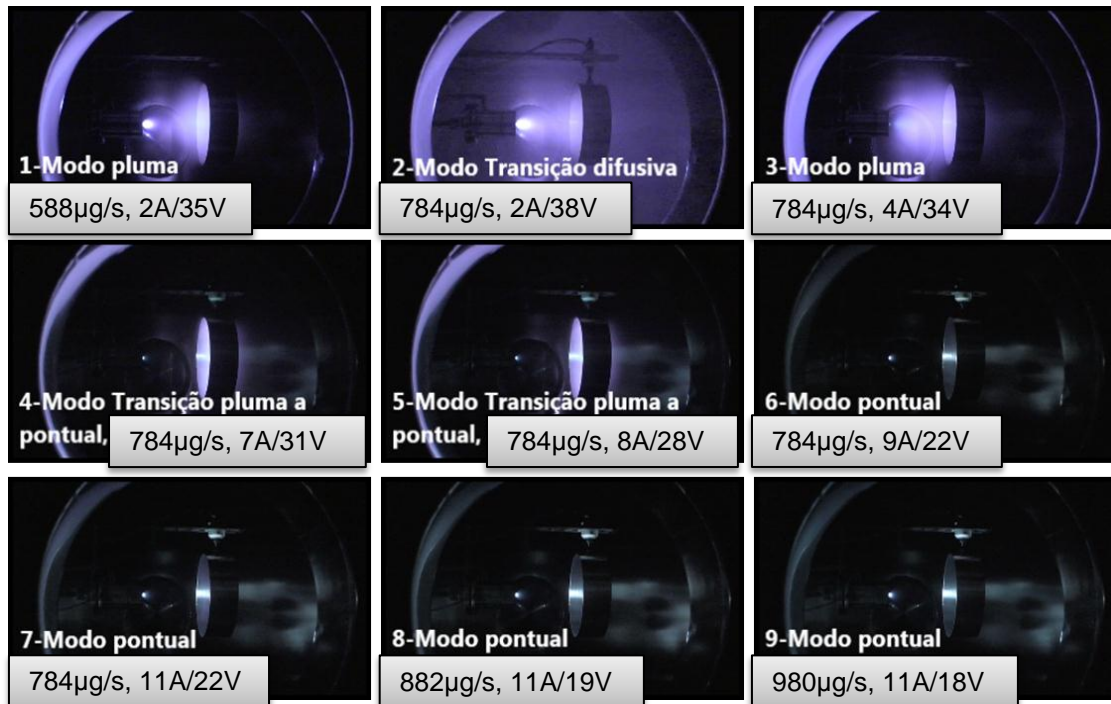


Figura 4.11- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 294 e 980 $\mu\text{g/s}$, com gás xenônio para o catodo 7.

Na Figura 4.12 estão as curvas características V-I de descarga, para diferentes vazões mássicas testadas para o catodo 7.

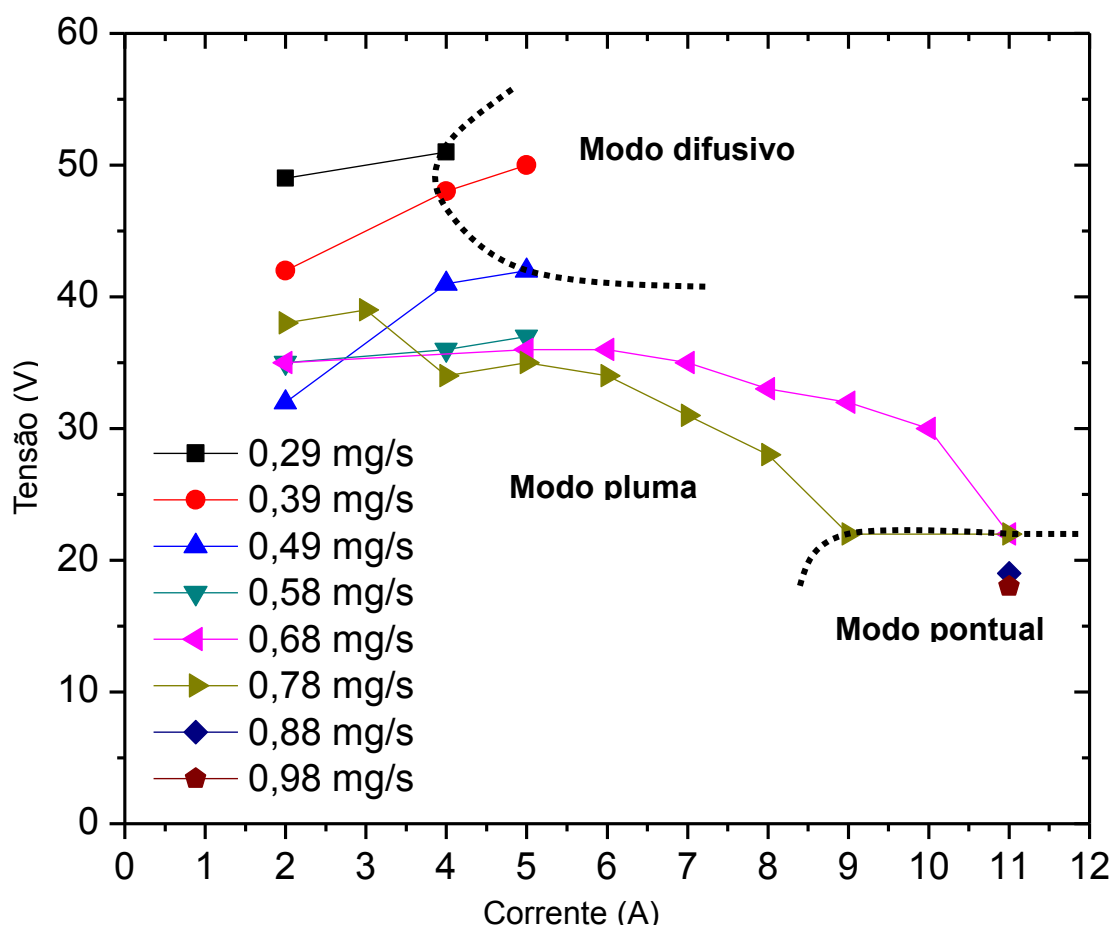


Figura 4.12- Curvas características V-I de descarga do catodo 7, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).

4.2.1.3. Catodo 10

No catodo 10 operando com xenônio, somente o modo difusivo e o modo pluma foram atingidos. O modo difusivo se apresentou para vazões mássicas menores que 882 $\mu\text{g/s}$ e com correntes de descarga maiores que 7 A conforme as Figuras 4.13 e 4.14, nessas condições a tensão de descarga foi maior que 30 V. Em contraste, o modo pluma para baixas vazões mássicas apresentou-se com baixas correntes de descarga, menores a 7 A.

As transições do modo pluma ao modo difusivo foram visualizadas com intensa oscilação do plasma. O plasma no modo pluma foi bem estável no caso de altas vazões mássicas conforme a Figura 4.15, ou seja, que não apresentou muitas oscilações. Usualmente, uma “bola” de plasma é observada no interior

do jato de plasma do catodo e junto ao orifício do eletrodo de vigia, tal zona é conhecida como “plasmoide” (MARTIN; WILLIAMS, 2009), pode-se observar na Figura 4.15, nas sequências 2, 3 e 8. Na Figura 4.16 estão as curvas características V-I de descarga, para diferentes vazões mássicas testadas do catodo 10.

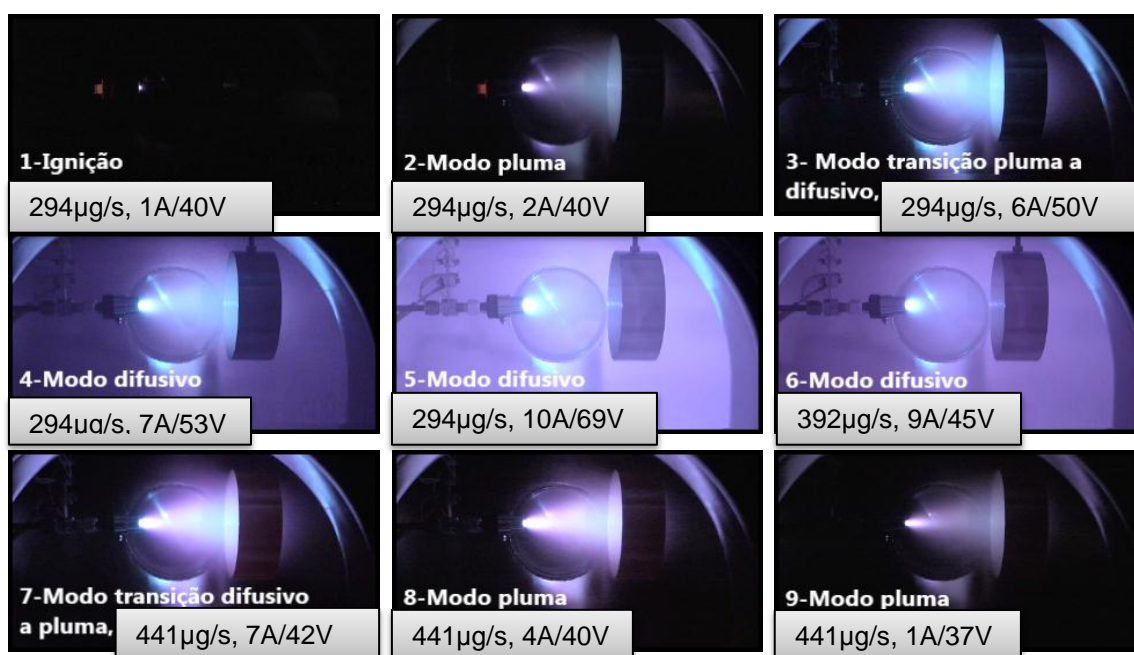


Figura 4.13- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas menores que 441 μ g/s, com gás xenônio para o catodo 10.

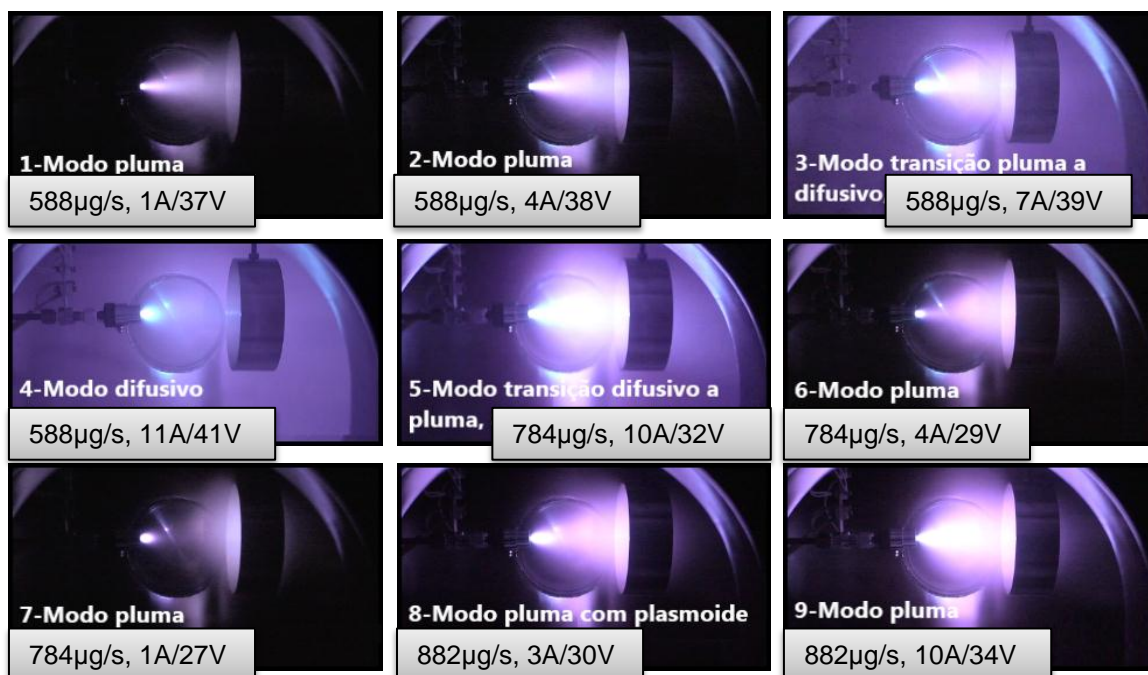


Figura 4.14- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 588 e 882 μ g/s, com gás xenônio para o catodo 10.

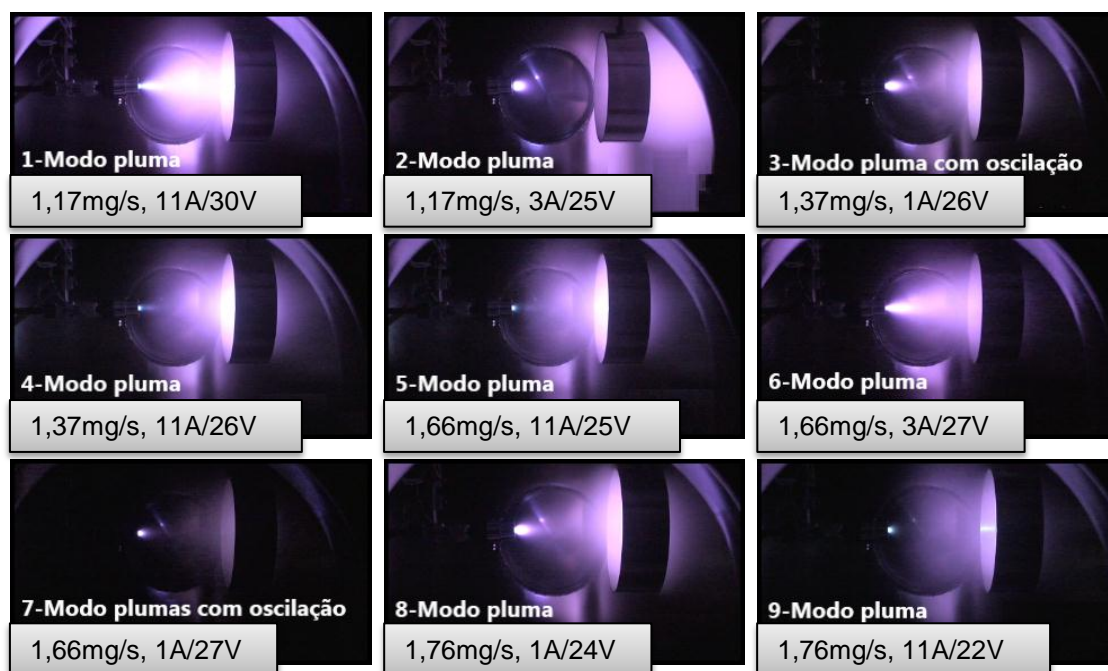


Figura 4.15- Sequência de variação dos modos de operação para diferentes correntes de descarga e vazões mássicas entre 1,17 e 1,76 mg/s, com gás xenônio para o catodo 10.

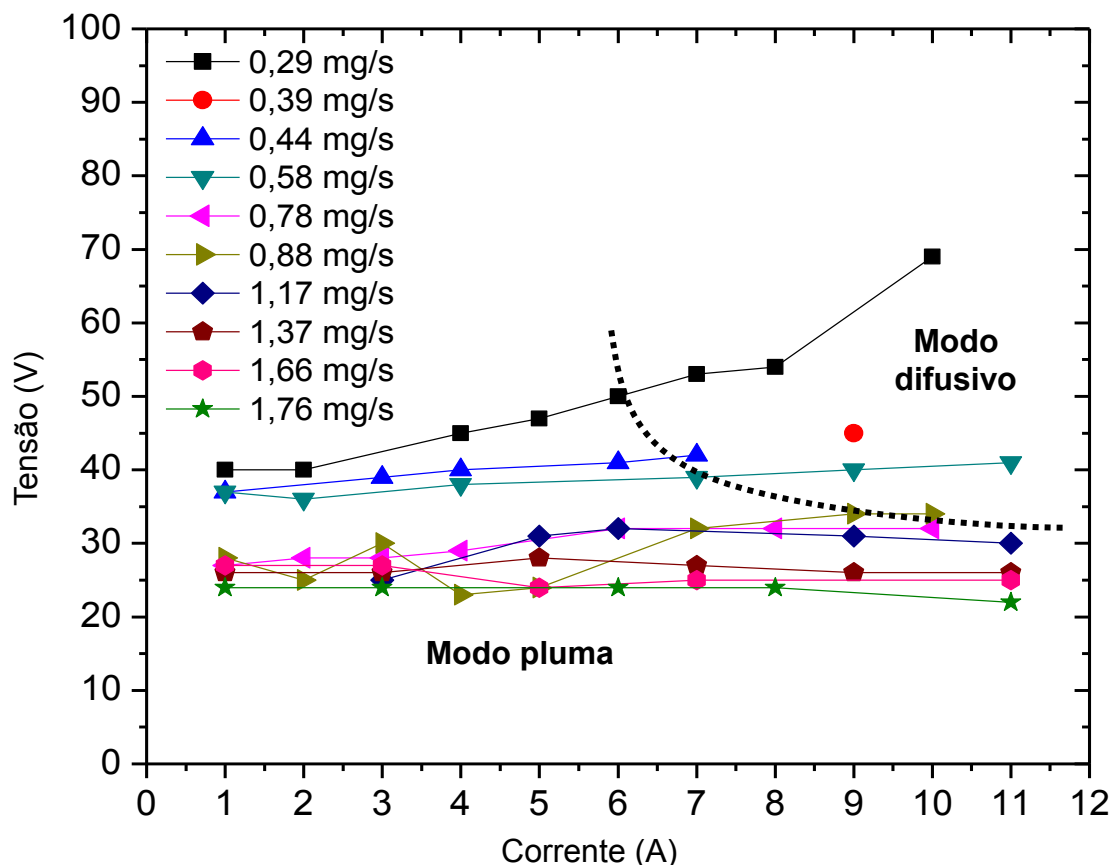


Figura 4.16- Curvas características V-I de descarga do catodo 10, para diferentes vazões mássicas de gás xenônio. As linhas ponteadas diferenciam a partir de que valores de corrente e tensão são atingidos os diferentes modos de descarga (difusivo, pluma e pontual).

4.2.2. Resultados com argônio

4.2.2.1. Catodo 5

No caso dos experimentos feitos no catodo 5, com argônio foi testada somente a ponteira do eletrodo de vigia com orifício de 3 mm de diâmetro. Com tal configuração geométrica, foram observados os três modos de operação no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo. Primeiramente, o modo pluma foi atingido com alta vazão mássica, corrente de descarga 3 A e tensão de descarga de 80,4 V. Em seguida, quando a corrente de descarga foi variada e a tensão de descarga aumentou a valores superiores a 80 V, o modo difusivo foi atingido. Por último, o modo pontual somente foi mantido com vazão mássica de aproximadamente 1,8 mg/s, com alta corrente de descarga

de 8 A e baixa tensão de descarga de 19 V. Também, não se deve esquecer que se apresentaram altas flutuações na pressão devido a alta vazão mássica, isto teve uma grande influência nas medições de sonda, que de fato puderam ser feitas somente até uma distância máxima de até 20 mm com respeito à superfície do eletrodo de vigia. Isso, porque o catodo não manteve o modo pontual por mais tempo, e a coleção de dados se limitou a essa distância.

4.2.2.2. Catodo 7

Com gás argônio, o catodo operou em dois modos sendo eles, pluma e difusivo. O modo pluma foi atingido imediatamente na ignição, com uma vazão de 87 $\mu\text{g/s}$, uma corrente de descarga de 5,5 A e tensão de descarga de 200 V, no circuito elétrico de corrente de descarga de tríodo (Figura 1.2(c)). As experiências no modo pluma foram feitas com vazões mássicas menores que 174 $\mu\text{g/s}$, com correntes de descarga menores que 3 A e com tensões de descarga entre 24 e 191,5 V. As menores tensões de descargas foram observadas na configuração de emissão diodo com eletrodo de vigia.

O modo difusivo foi observado na condição específica de vazões mássicas entre 116 e 145 $\mu\text{g/s}$, corrente de descarga de 5,5 A e tensão de descarga de até 200 V, na configuração tríodo. Como consequência da alta tensão de descarga, em alguns dos casos o catodo parou de funcionar.

4.2.2.3. Catodo 10

Em contraste aos testes do catodo 7, no catodo 10 com argônio não se manteve a descarga com baixa vazão mássica, por isso, foram feitos testes com alta vazão mássica, superior a 493 $\mu\text{g/s}$, somente no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo e no modo pluma. Nesse caso, a corrente de descarga foi variada entre 3 e 6 A, atingindo-se tensões de descarga entre 64,5 V e 76,5 V, respectivamente. Nessas condições, o consumo de potência com gás argônio foi muito alto em comparação aos testes realizados com gás xenônio e em comparação aos testes com os outros catodos (5 e 7).

4.3. Parâmetros de plasma

O processamento de dados para cada distância axial com respeito à superfície do eletrodo de vigia, segundo o procedimento de medição na seção 3.3.4, permitiu obter informações sobre os parâmetros de plasma nessas posições. Com isso, foram feitos perfis dos parâmetros de plasma nos modos de operação e condições de descarga testadas para cada catodo. Os parâmetros de plasma tais como, temperatura de elétrons, densidade de elétrons e comprimento de Debye foram obtidos por três métodos, sendo eles: procedimento clássico de Langmuir, ajuste exponencial e o método de Druyvesteyn (Figura 4.17(a)). O método de Druyvesteyn foi o mais apropriado para avaliar esses parâmetros de plasma, pois ele usa a função distribuição de energia dos elétrons, FDEE. Neste sentido, o método utiliza técnicas de integrais na curva característica I-V de sonda (seção 3.1.3) e a distribuição pode fornecer os parâmetros de plasma de forma exata. O potencial de plasma é calculado para esses resultados pelo método de derivada, também um método bem exato (Figura 4.17(b)). Outros parâmetros que serão mencionados nesses resultados tais como, potencial flutuante e densidade de íons foram obtidos conforme a seção 3.1.3.

As diferenças entre os métodos de sonda para estimativa dos parâmetros de plasma estão mostrados na Figura 4.17 (da densidade de elétrons e potencial de plasma, respectivamente). Por exemplo, os métodos de ajuste exponencial e procedimento de Langmuir para a estimativa da densidade dos elétrons obtêm densidades maiores que o método de Druyvesteyn (que é o método mais exato). Para o cálculo do potencial de plasma, o método de derivada calcula maiores valores que o método de procedimento de Langmuir. Como observado na Figura 4.17 são notáveis as diferenças entre os métodos de estimativa dos parâmetros de plasma, e, desta forma, é mais adequado ter em conta o método baseado nas derivadas da curva I-V que se aplica também para realizar a estimativa da FDEE.

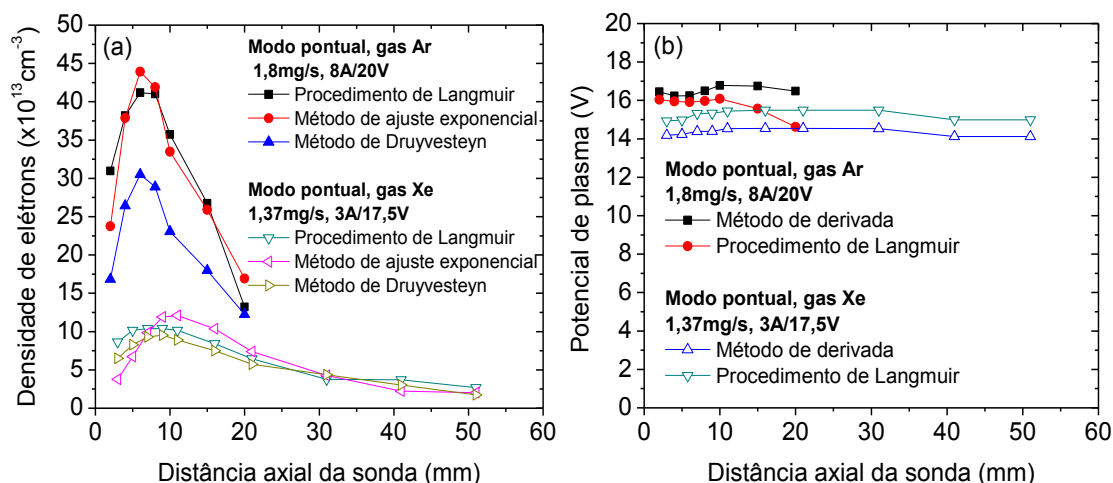


Figura 4.17- Exemplo de comparação da densidade de elétrons obtida pelos métodos: procedimento de Langmuir, método de ajuste exponencial e método de Druyvesteyn (a) e comparação do potencial de plasma obtido pelos métodos: procedimento de Langmuir e método de derivada (b), para testes realizados com argônio e xenônio no catodo 5.

Por outro lado, os catodos ocos são dispositivos capazes de fornecer alta densidade de plasma. Usualmente, alta densidade de plasma deve ser produzida com baixa temperatura de elétrons e baixo potencial de plasma. Essas são as melhores condições de operação num catodo oco conforme a literatura (RUDWAN, 2003). Além disso, é importante que um catodo oco opere de forma eficiente utilizando o mínimo de vazão mássica e potência de descarga.

Neste texto serão mostrados apenas os resultados de máxima densidade de plasma com gás xenônio e argônio dos catodos 5, 7 e 10, e no apêndice B se mostram todos os resultados obtidos para todos os testes realizados.

Levando-se em consideração os aspectos mencionados nos parágrafos anteriores, a maior densidade de elétrons foi observada no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo, no modo pontual para os catodos: 5 com argônio e xenônio, 7 com xenônio e também, no modo pluma para o catodo 10 com xenônio. De acordo com a Figura 4.18 (a) e (b), o maior pico de densidade tanto de elétrons como de íons concentra-se a aproximadamente 9 mm de distância axial com respeito às superfícies dos eletrodos de vigia. Note-se para o catodo 7 que o maior valor de densidade de elétrons foi obtido a uma

distância de 21 mm da ponteira do eletrodo de vigia. Isto se deve ao fato do valor da corrente coletada pela sonda ter sido limitada para não ultrapassar o limite de corrente da fonte de alimentação da sonda (máximo de 1 A) e, também, para evitar danos por superaquecimento da sonda.

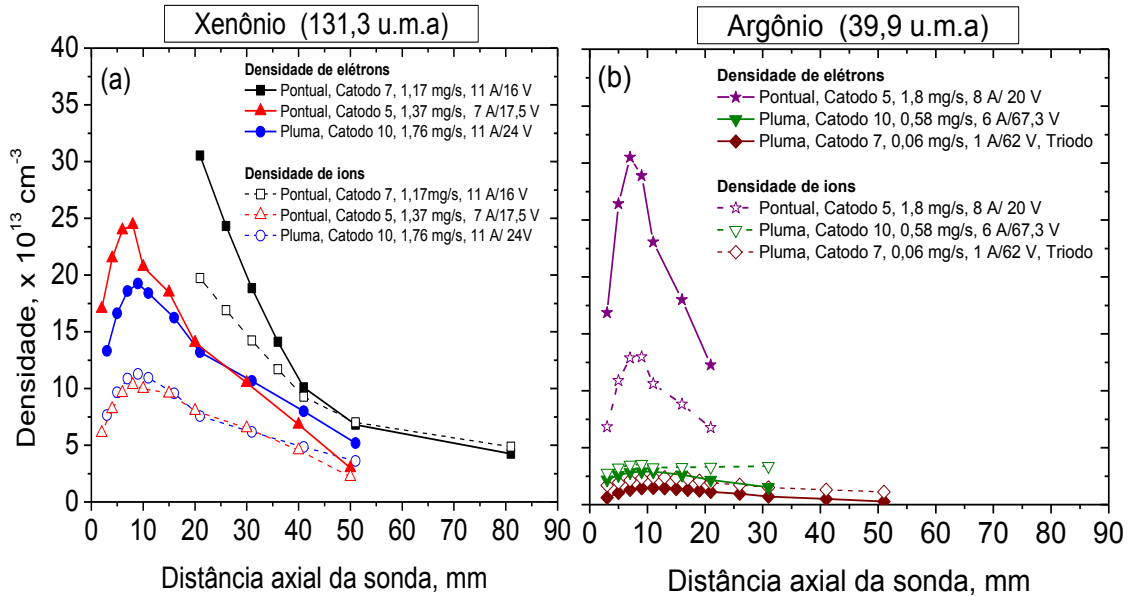


Figura 4.18- Densidade de elétrons e íons em função da distância axial da sonda para testes com xenônio e com argônio, realizados com os catodos 5, 7 e 10.

Os perfis de densidade de elétrons mostradas na Figura 4.18 foram observados para todos os casos testados e podem ser vistos também nos gráficos de densidade de elétrons e íons dos apêndices B.5 e B.6, para todos os testes realizados nos catodos 5, 7 e 10, respectivamente.

Os picos de densidade de elétrons para os catodos 5 e 7 em modo pontual para argônio e xenônio foram de aproximadamente $3,07 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (Figura 4.18 (a) e (b)). Já para o catodo 10 em modo pluma foi de $1,93 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ com xenônio (Figura 4.18(a)) e $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ com argônio (Figura 4.18(b)). Os gráficos da Figura 4.18 (a) e (b) mostram que os picos de densidade de íons foram um pouco menores que a densidade de elétrons sendo eles: no modo pontual para os catodos 7 e 5 com xenônio entre $1,66$ e $1,9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (Figura 4.18 (a) e (b)) e no modo pluma para o catodo 10 de $1,14 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (Figura

4.18 (a)). Dado o exposto, percebemos que a maior densidade foi obtida nos casos de modo pontual com xenônio e argônio no catodo 5, no modo pontual, somente com xenônio, no catodo 7 e no modo pluma, somente com xenônio no catodo 10. Percebemos também que as maiores densidades de plasma são produzidas com alta vazão mássica, alta corrente de descarga e baixos valores de tensão de descarga.

Na Figura 4.18 (b) pode ser observado que as maiores densidades de elétrons e íons em modo pluma com argônio foram produzidas pelos catodos 7 e 10. O catodo 7 apresentou alta densidade de plasma, operando com baixa vazão mássica, baixa corrente de descarga e alta tensão de descarga. Mas tal densidade de plasma foi muito menor que nos casos de modo pontual ou no melhor caso em modo pluma com xenônio mostrado na Figura 4.18(a).

Para sintetizar, na Tabela 4.2 estão os valores dos parâmetros de plasma na ordem decrescente (de cima para baixo) dos valores máximos de densidade de plasma para os diferentes testes e catodos, em diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga e modos de descarga. De acordo com essa tabela, pode-se observar que as maiores densidades de plasma foram atingidas com xenônio e num único caso com argônio (catodo 05 em modo pontual). Também, o modo pontual, atingido no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com eletrodo de vigia, apresentou as menores densidades de plasma em comparação ao circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo.

No caso do modo pontual, com argônio, no catodo 5 a vazão mássica foi maior em comparação às vazões testadas com xenônio. Para exemplificar, temos que 1,8 mg/s de argônio foram necessários para atingir o modo pontual no catodo 5. Em contraste, 1,37 mg/s foram necessários para atingir o modo pontual nesse mesmo catodo, e 784 $\mu\text{g/s}$ são necessários para atingir o modo pontual no catodo 7.

As densidades máximas de elétrons no modo transição de pluma a pontual foram relativamente altas, entre 5,3 a $11 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ e, nesta mesma condição

de descarga, a densidade de íons foi entre $2,9$ a $7,9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, para os catodos 7 e 5 operando com xenônio e podem ser observados nos gráficos de densidades de elétrons e íons das Figuras B.13, B.14, B.16 e B.17 dos apêndices B.5 e B.6.

As altas densidades de plasma no modo pontual e no modo transição de pluma a pontual, mostrados na Tabela 4.6, estão acompanhadas de temperaturas na faixa de $0,6$ a $2,3$ eV com potenciais de plasma menores a $16,5$ V. Em tais casos, o potencial de plasma V_p foi menor ou aproximadamente igual à tensão de descarga V_d . Por outra parte, a temperatura de elétrons nos casos do modo pluma de alta densidade de plasma variaram entre $2,5$ a $5,6$ eV, um pouco maior que a apresentada no modo pontual. O potencial de plasma nesses casos está entre 12 a $16,8$ V e é menor que a tensão de descarga que esta na faixa de $23,6$ a 38 V.

Tabela 4.6- Valores máximos de densidade de elétrons e parâmetros de plasma para uma distância de 9 mm com respeito à superfície do eletrodo de vigia. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo.

Modo pontual								
Circuito elétrico de corrente de descarga	Catodo/Gás	\dot{m} (mg/s)	I_d (A)	V_d (V)	n_e ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)	n_i ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)	T_e (eV)	V_p (V)
DA	5/Ar	1,8	8	19,6	30,7	13,5	0,6	16,5
DA	7/Xe	1,17	11	16	30,6	19,8	1,4	16,5
DA	5/Xe	1,37	7	17	22,4	10,2	1,8	13,5
DA	7/Xe	0,78	11	22	16	14,2	2,1	14
DA	7/Xe	1,17	5	15,7	12,7	7	1,3	15,6
DA	5/Xe	1,37	3	17,5	9,5	4,5	1,2	13,8
DEV	7/Xe	0,88	3,2	11	6,7	4,4	1,7	11
DEV	7/Xe	0,58	3,2	11	3,5	2,9	1,7	8,9
DEV	7/Xe	0,29	3,2	14	1,7	2,2	2,1	6
Modo transição de pluma ao pontual								
DA	7/Xe	0,78	3	31,9	11	7,9	3	14,1
DA	5/Xe	1,17	3	33,7	5,3	2,9	2,3	13
Modo pluma								
DA	10/Xe	1,76	11	23,6	19,3	11,4	2,5	12
DA	10/Xe	1,37	11	28,3	12	8	2,8	9,9
DA	10/Xe	0,98	11	33	8,8	6,3	3,7	12,7
DA	10/Xe	1,76	4	24,4	4,9	3,9	2,9	11,8
T	10/Xe	1,37	5	38	4,1	2,8	3,9	12,5
DA	10/Xe	1,37	4	29	3,3	2,3	5,6	16,8

Prosseguindo, os valores de temperatura e potencial de plasma foram consideravelmente baixos para os testes onde foram obtidas as maiores densidades de plasma, para todos os catodos em questão e em diferentes modos de operação, como pode ser observado na Figura 4.19 e 4.20.

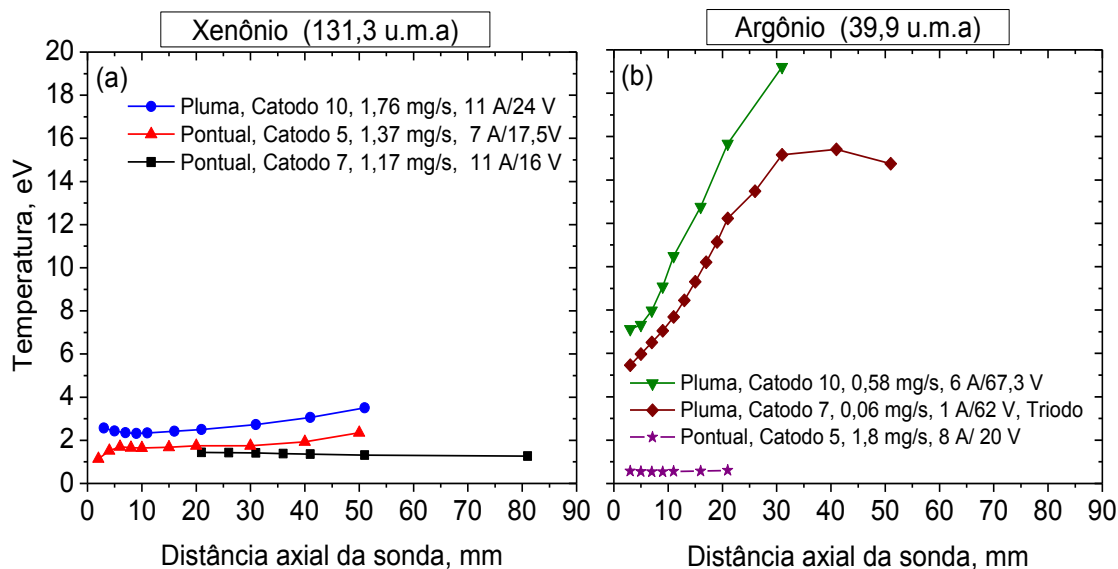


Figura 4.19- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda para os testes com xenônio e com argônio, realizados nos catodos 5, 7 e 10 da Figura 4.18.

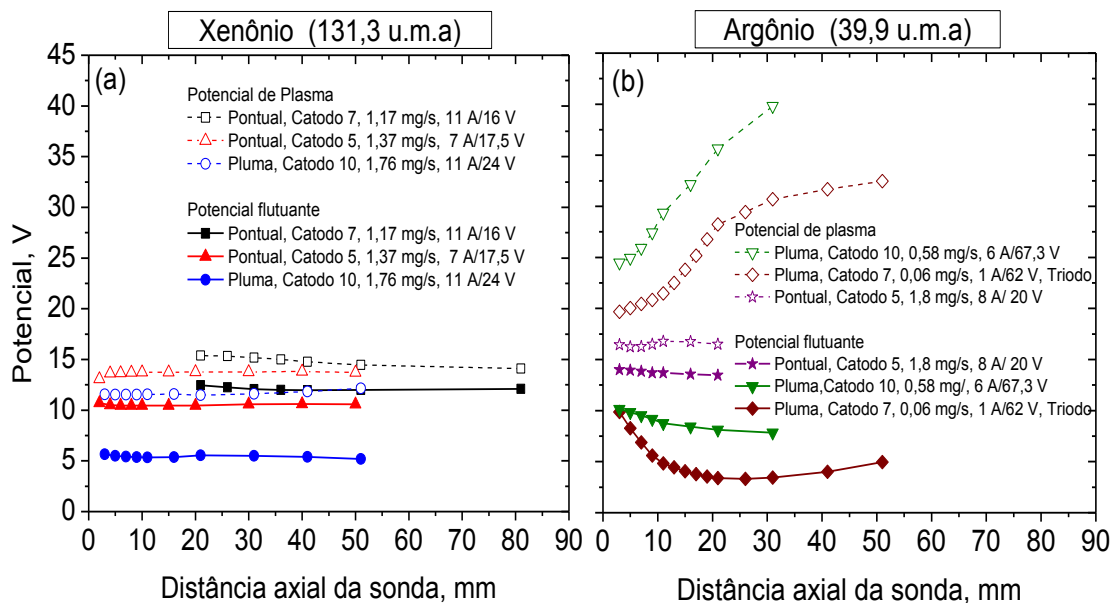


Figura 4.20- Potencial de plasma e potencial flutuante em função da distância axial da sonda para os testes com xenônio e com argônio, realizados nos catodos 5, 7 e 10 da Figura 4.18.

No modo pluma e no modo pontual, onde a densidade de plasma é alta com gás xenônio e argônio, a distribuição da temperatura de elétrons, o potencial de plasma e o potencial flutuante em função da distância axial com respeito à superfície do eletrodo de vigia, são todos praticamente constantes e se mantêm em baixos valores. Em contrapartida, para os casos de menor densidade de plasma observados, sobretudo com gás argônio, os parâmetros de plasma como a temperatura de elétrons, potencial de plasma, e potencial flutuante, variam consideravelmente ao longo da distância axial com respeito à superfície do eletrodo de vigia. Isso se pode ser observado nas Figuras 4.19(b) e 4.20(b) para o modo pluma nos catodos 7 e 10 com argônio. Nesses casos, a temperatura de elétrons e o potencial de plasma aumentam ao longo da distância, sendo maiores perto do anodo. A maioria dos testes nos catodos 5, 7 e 10 em modo pluma, sobretudo em condições de alta tensão de descarga, apresentaram tais características. As curvas de potencial flutuante, potencial de plasma e temperatura de elétrons dos apêndices B.1, B.2 e B.4, corroboram tal comportamento.

Na Tabela 4.7 são apresentadas as condições de descarga na ordem de maiores a menores densidades de elétrons, em modo pluma, para todos os catodos e que apresentaram uma densidade de elétrons igual ou inferior a $3,1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ para uma distância de 9 mm da ponteira do eletrodo de vigia. Tal situação merece destaque, pois tanto a temperatura de elétrons quanto o potencial de plasma variam consideravelmente ao longo da distância entre o eletrodo de vigia e o anodo, com pode ser observado na tabela 4.8 e nas Figuras B.4, B.5, B.6, B.10, B.11, B.12 dos apêndices B.2 e B.4.

Na maioria dos casos críticos, a densidade de elétrons foi menor que a densidade de íons, sobretudo para densidades de elétrons menores que $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Tais casos críticos foram obtidos com correntes de descarga menores que 6 A, usualmente para baixas vazões mássicas e tensões de descarga maiores que 31 V. O circuito elétrico de corrente de descarga de tríodo para o catodo 7 apresentou as condições a mais críticas, onde os perfis de

temperatura de elétrons e potencial de plasma mudaram notavelmente ao longo da distância testada.

Tabela 4.7- Valores máximos das densidades de elétrons e íons na distância de 9 mm com respeito à superfície do eletrodo de vigia, para catodos 5, 7 e 10 em modo pluma. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo. Os valores destacados em vermelho representam os de maior oscilação da temperatura de elétrons e do potencial de plasma ao longo da distância testada.

Circuito elétrico de corrente de descarga	Catodo/Gás	\dot{m} (mg/s)	I_d (A)	V_d (V)	n_e ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)	n_i ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)
DA	10/Xe	0,58	4	39	3,1	2
DA	10/Xe	0,98	4	24,82	3	2,2
DA	10/Ar	0,58	6	31	3	3,4
DA	7/Xe	0,29	3	60,44	2,9	2,5
DA	10/Xe	0,29	4	51	2,4	1,6
DA	5/Ar	0,58	3	80,4	2,3	3
DA	7/Xe	0,49	2,08	38,86	1,7	2,9
DEV	10/Xe	0,78	2	12	1,6	1,9
DA	5/Xe	0,49	2	38,5	1,6	2,2
T	7/Ar	0,06	3,02	130	1,6	2,4
DA	10/Ar	0,29	3	76,5	1,6	2,6
DA	10/Ar	0,58	3	64,5	1,6	2
T	7/Ar	0,06	2,75	86,74	1,5	2,4
T	7/Ar	0,12	3,06	130	1,2	2,4
DA	7/Xe	0,29	2,09	49,43	1,1	2,2
DEV	7/Ar	0,06	2	37	1,1	1,6
DEV	7/Ar	0,17	2	26	1	1,4
DA	10/Xe	0,98	1	29,27	0,9	1,7
DEV	10/Xe	0,58	2	13,5	0,9	1,9
T	7/Ar	0,17	2,95	165,1	0,9	2,4
DA	10/Xe	0,29	1	47	0,8	0,8
DA	10/Xe	0,58	1	38	0,8	1,8
T	7/Ar	0,17	2,49	188,8	0,8	2
DEV	7/Ar	0,06	1,6	37	0,8	1,1
T	7/Ar	0,12	2,58	191,9	0,8	2
DEV	10/Xe	0,29	2	12	0,7	1,8
DEV	7/Ar	0,17	1	24,5	0,6	0,5
DEV	7/Ar	0,17	1,6	26,5	0,5	0,7

Tabela 4.8- Valores mínimos e máximos das temperaturas de elétrons e potencial de plasma, para catodos 5, 7 e 10 em modo pluma. As siglas correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: DA é diodo com anodo, DEV é diodo com eletrodo de vigia, e T é Tríodo. Os valores destacados em vermelho representam os de maior oscilação da temperatura de elétrons e do potencial de plasma ao longo da distância testada.

Circuito elétrico de corrente de descarga	Catodo/Gás	\dot{m} (mg/s)	I_d (A)	V_d (V)	T_e (eV)	V_p (V)
DA	10/Xe	0,58	4	39	3,9-12,7	14,3-2,5
DA	10/Xe	0,98	4	24,82	2,9-5,8	14,1-15,5
DA	10/Ar	0,58	6	31	3,7-1,7	27,3-47
DA	7/Xe	0,29	3	60,44	4,7-32,4	19,5-57,5
DA	10/Xe	0,29	4	51	5,2-32,4	17,5-58,5
DA	5/Ar	0,58	3	80,4	5,5-2,8	32,3-40,9
DA	7/Xe	0,49	2,08	38,86	5,5-19,5	20,4-43,5
DEV	10/Xe	0,78	2	12	2-4,6	9,6-9,5
DA	5/Xe	0,49	2	38,5	3,9-8	17,8-20,4
T	7/Ar	0,06	3,02	130	2,2-5	21,6-44,8
DA	10/Ar	0,29	3	76,5	3,8-2,1	25,8-39,6
DA	10/Ar	0,58	3	64,5	4-1,6	24,4-39,6
T	7/Ar	0,06	2,75	86,74	2,1-6,5	19,6-32,4
T	7/Ar	0,12	3,06	130	1,5-3,3	17,5-38,7
DA	7/Xe	0,29	2,09	49,43	2,4-27,1	19,5-57,5
DEV	7/Ar	0,06	2	37	2,6-1,6	11,4-9,4
DEV	7/Ar	0,17	2	26	1,1-1,5	12,2-10,1
DA	10/Xe	0,98	1	29,27	2,4-7,7	15,6-18,4
DEV	10/Xe	0,58	2	13,5	2,9-3,6	8,8-8,9
T	7/Ar	0,17	2,95	165,1	2,2-5,3	20,6-65,4
DA	10/Xe	0,29	1	47	6,7-19,7	20,36-37,6
DA	10/Xe	0,58	1	38	3,9-12,7	14,3-2,5
T	7/Ar	0,17	2,49	188,8	2,9-5,8	14,1-15,5
DEV	7/Ar	0,06	1,6	37	3,7-1,7	27,3-47
T	7/Ar	0,12	2,58	191,9	4,7-32,4	19,5-57,5
DEV	10/Xe	0,29	2	12	5,2-32,4	17,5-58,5
DEV	7/Ar	0,17	1	24,5	5,5-2,8	32,3-40,9
DEV	7/Ar	0,17	1,6	26,5	5,5-19,5	20,4-43,5

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os primeiros resultados sobre a preparação dos catodos permitiram estabelecer que o catodo 5 apresentou melhores características de termalização que os catodos 10 e 7, já que seu contato de filamento aquecedor com o corpo do catodo foi bem adaptado. No entanto, o catodo 10 apresentou melhores características de ignição apesar de apresentar dificuldades com o contato elétrico do seu filamento aquecedor com o corpo do catodo, seguidamente o catodo 7 e por último o catodo 5.

Tendo em vista os aspectos observados na ignição, entendemos que a configuração geométrica dos catodos tem um papel fundamental para facilitar esse procedimento. Conforme a Tabela 3.1, a relação de áreas entre os orifícios das ponteiros do catodo e do eletrodo de vigia são $(AR_2)_{catodo\ 10} > (AR_2)_{catodo\ 07} > (AR_2)_{catodo\ 05}$, sendo que as relações de áreas dos orifícios da ponteira do catodo e do inserto foram $(AR_1)_{catodo\ 10} < (AR_1)_{catodo\ 07} < (AR_1)_{catodo\ 05}$. O catodo 10, por um lado, tem uma maior relação de área AR_2 , onde o eletrodo de vigia tem uma maior área para atrair os elétrons. Por outro lado, a menor relação de área AR_1 , desse catodo permite uma melhor extração dos elétrons e que o campo elétrico penetre facilmente na região de plasma do orifício do catodo. As relações de área entre os catodos devem ser tais que facilitem a ignição e que o catodo opere sem que haja superaquecimento das peças, nem drenagem de corrente por parte do eletrodo de vigia.

Com relação aos resultados envolvendo a variação dos parâmetros de operação tais como, vazão mássica e corrente de descarga, foram observados três diferentes modos de descarga (pluma, pontual e difusivo) e suas transições. Na sequência de fotografias mostrando a variação dos modos na seção 4.2, pode-se observar como a pluma de plasma mudou sua forma visual conforme a vazão e a corrente de descarga foram reguladas. Por exemplo, um cone de plasma, usualmente com “plasmóide”, foi característico do modo pluma. Quando a vazão mássica e a corrente de descarga foram aumentadas um pouco mais, o cone também aumentou assumindo uma forma de “bulbo”.

Conforme se aumentava ainda mais a vazão mássica e corrente de descarga, o bulbo desaparecia e observou-se somente um ponto luminoso no orifício do eletrodo de vigia, esse último sendo característico do modo pontual (para os catodos 05 e 07). Como mencionado na seção 4.2 as transições de um modo a outro foram eletricamente ruidosas, sobretudo a transição do modo pluma a difusivo a frequência de oscilação foi alta. Mas algumas transições de modo pluma a pontual apresentaram plumas de plasma muito estáveis, nas quais foram realizadas medições de sonda. Por último, o modo difusivo foi muito mais ruidoso que o modo pluma. Neste modo o plasma iluminou todo o volume interno da câmara de vácuo. Na Tabela 5.1 se sintetizam os valores típicos para os modos de descarga dos três catodos testados para gás xenônio.

Tabela 5.1- Parâmetros operacionais típicos para os modos de descarga dos catodos 5, 7 e 10 para gás xenônio.

Modo	Parâmetros	Catodo 05	Catodo 07	Catodo 10	
Pluma	\dot{m} I_d V_d	0,39 a 1,27 mg/s 1 a 11 A 23 a 50 V	0,29 a 0,78 mg/s 1 a 8 A 23 a 50 V	0,29 a 0,88 mg/s <6 A 25 a 50 V	0,78 a 1,76 mg/s 1 a 11 A 23 a 33 V
Difusivo	\dot{m} I_d V_d	<0,39 mg/s >1 A >55 V	<0,49 mg/s > 5A >42 V	0,29 a 0,88 mg/s >6 A >33 V	-----
pontual	\dot{m} I_d V_d	>1,37 mg/s 3 a 11 A <22 V	>0,78 mg/s >9 A <22 V	-----	-----

Na Tabela 5.1 pode-se observar que a tensão de descarga no modo pluma está na faixa de 23 a 50 V para os três catodos testados. Os valores das correntes de descarga mudam para vazões similares, mas comumente estão entre 1 e 11 A. Por outro lado, a tensão de descarga para o modo pontual é menor que 22 V para os catodos 5 e 7. No caso do catodo 5 é possível permanecer no modo pontual aplicando-se correntes de descarga menores que no catodo 7, mas isso requer uma maior vazão mássica.

Por outra parte, o modo difusivo foi observado com menores vazões mássicas (entre 0,39 e 0,49 mg/s) e a partir de menores correntes de descarga (maiores

que 1 ou 5 A) para os catodos 5 e 7, com tensões de descarga sendo, $(V_d)_{05} > (V_d)_{07} > (V_d)_{10}$. Para o catodo 10, o modo difusivo pôde ser observado com maiores vazões mássicas e com maior corrente de descarga.

Tendo em vista os aspectos observados, os modos de descarga de catodos ocos são casos especiais de descargas elétricas luminescentes (de alta e baixa tensão) e de arco, incluindo também as autossustentadas (OKS, 2006). Em todos os tipos de descargas existe uma influência típica da corrente de descarga sobre a tensão de descarga (curva característica V-I de descarga). Mas, também a vazão mássica (portanto a pressão no interior do catodo) e aspectos geométricos dos catodos desempenham um papel importante na descarga. Segundo a literatura os tipos de descarga em catodos ocos são determinados pelos mecanismos de emissão de elétrons (OKS, 2006). Os modos pluma e difusivo podem ser catalogados como uma descarga luminescente de baixa e alta tensão, nesse caso, como mencionado na seção 2.6, o plasma é fracamente ionizado e está em um estado de não equilíbrio, onde uma coluna brilhante é observada. A distribuição de campo elétrico é elevada fora do catodo e o plasma é quase neutro eletricamente.

No caso de modo difusivo a descarga é luminescente de alta tensão, ocorrendo principalmente com baixa vazão mássica (baixa pressão), o livre caminho médio das partículas aumenta, então, há menos átomos do gás por unidade de volume e, portanto, o que diminui a probabilidade de que um elétron chocar-se com um átomo neutro (lei de Paschen) (NASSER, 1971). Nesse caso, a ionização do gás é mais fraca que no modo pluma e mais ainda que no modo pontual.

A transição de modo pluma a pontual do catodo 7, também é similar à transição de descarga luminescente a arco, pois nesse caso, a transição passa por um estado instável. A transição abrupta representa um tipo de instabilidade, na qual a descarga evolui até um modo mais “econômico” de fornecimento de cargas (menor tensão). O modo pluma observado para o catodo 7, gerado depois de uma transição instável (Figura 4.11), pode ser mais característico de um arco não térmico (arco com catodo frio) (OKS, 2006), nesse caso, o plasma

que se gera ainda não está em equilíbrio termodinâmico, sendo a temperatura dos elétrons diferente da temperatura dos íons e dos átomos neutros. Nesse caso, a tensão de descarga é maior que no modo pontual, mas muito menor que no modo difusivo. Em contraste a esta transição instável, a transição do modo pluma ao modo pontual do catodo 05 apresentou uma transição estável e em presença de histerese.

Finalmente, o modo pontual é semelhante a um arco térmico (arco com catodo quente), já que o plasma se apresenta estável e segundo Oks (2006) está em equilíbrio termodinâmico produzindo alta corrente, o que foi observado nos perfis dos parâmetros de plasma (apêndices B). Na característica V-I de descarga de um gás (Figura 2.11) observa-se que o arco térmico é estabelecido para correntes maiores a 50 A, entretanto, no catodo oco este regime pode ser estabelecido com correntes muito menores (até 11A). Nas descargas de arco os elétrons são emitidos pelos processos termodinâmicos, devido ao aquecimento do catodo. Segundo Siegfried e Wilburt (1983), no modo pontual existe um alto grau de ionização, que no caso é característico de uma descarga de arco térmico. Uma grande energia se dissipa na coluna de arco devido ao efeito Joule, condução térmica e radiação (mecanismos de operação supostos para operação do catodo, seção 2.5.2). No arco é favorecida a emissão secundária e a emissão de elétrons é muito alta, além disso, a emissão termiônica é também alta devido à alta energia térmica do catodo (OKS, 2006). Isso resulta em alta densidade de corrente de elétrons e de íons, o que justifica que essas densidades sejam maiores no modo pontual que nos outros modos. Dentro do catodo a temperatura é alta e a densidade de corrente também. Essas condições fazem com que para se manter a corrente de descarga não seja necessária tanta tensão, portanto, esta diminui. Não existe até hoje uma teoria que explique satisfatoriamente os fenômenos do modo pontual (conhecido também como “spot” catódico segundo Oks (2006)). Essa situação é devida à enorme complexidade deste fenômeno físico, no qual existem processos de estado sólido, de superfícies, de plasma, elétricos e térmicos, além disso, fortemente interconectados. O ponto crucial é entender o mecanismo de emissão.

Os resultados complementares para avaliar o comportamento dos catodos estudados e os modos de descarga foram os perfis das curvas dos parâmetros de plasma. Fundamentalmente, os melhores resultados apresentaram-se com xenônio porque obtiveram-se as mais altas densidades de plasma nos modos: pluma, pontual e transição de pluma a pontual.

O catodo 05 foi o único que operou em modo pontual com argônio, proporcionando alta densidade de plasma. Mas, como mencionado no capítulo 4 é necessária alta vazão mássica para atingi-lo com esse gás.

Levando-se em conta o que foi observado experimentalmente, na Tabela 5.2 estão resumidos de forma geral os parâmetros de plasma estimados segundo os modos de descarga atingidos, com argônio e xenônio. As menores densidades de plasma estão relacionadas à alta temperatura de elétrons e ao alto valor de tensão de descarga, esta última é muito maior que o potencial de plasma. Em contrapartida, para uma maior densidade de plasma a tensão de descarga é quase igual ao potencial de plasma pelo qual o balanço de cargas é bem equilibrado, isso é o que acontece no modo pontual.

Tabela 5.2- Parâmetros de plasma para os modos observados nos experimentos com todos os catodos para argônio e xenônio.

Modo	Densidade de elétrons ($\times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)	Densidade de plasma	Tensão de descarga e Potencial de plasma	Temperatura de elétrons (eV)
Pontual	$1,7 \leq n_e \leq 30,7$	$n_e > n_i$	$V_d \geq V_p$	$T_e \leq 2,3$
Transição de pluma a pontual	$5,3 \leq n_e \leq 11$	$n_e > n_i$	$V_d > V_p$	$T_e \leq 3$
Pluma 1	$3,3 \leq n_e \leq 19,3$	$n_e > n_i$	$V_d > V_p$	$2,5 \leq T_e \leq 5,6$
Pluma 2	$n_e < 3,1$	$n_e < n_i$	$V_d \gg V_p$	$2 \leq T_e \leq 32,4$

Os perfis da temperatura de elétrons, do potencial flutuante e do potencial de plasma estão mostrados nos apêndices B.4, B.1 e B.2, respectivamente. Nesses perfis pode-se distinguir que foram observadas maiores variações do potencial flutuante, potencial de plasma e temperatura de elétrons ao longo da distância axial com respeito ao eletrodo de vigia, para os casos mencionados na Tabela 4.8, nos quais não há um plasma totalmente ionizado, sobretudo

com altas tensões de descargas. Além disso, os elétrons perto do anodo estão sendo acelerados em sua direção pela alta tensão de descarga, a velocidade de elétrons é alta e aumenta a temperatura desses elétrons perto do anodo. A maioria dos testes nos catodos 5, 7 e 10 em modo pluma, sobretudo em condições de elevada tensão de descarga apresentaram tais características.

Os perfis das densidades elétrons e de íons podem ser observados no apêndice B.5 e B.6, respectivamente, para todas as condições de operação dos catodos. Mais próximo ao anodo a densidade de plasma diminui, Isso pode ser explicado porque tanto no anodo como no catodo se originam fenômenos físicos complexos, a corrente elétrica perto do anodo é menor e se distribui em uma área maior que a área do catodo.

Finalmente, foi observado que os perfis das curvas de densidade de elétrons e íons mostram um comportamento diferente à distribuição de densidade de plasma observada nas medições com uma sonda rápida feita por Martin e Williams (2009), como está mostrado na Figura 5.1(a) a maior densidade de elétrons foi observada no orifício da ponteira do catodo e diminuiu ao longo da distância. Isso também foi observado nos estudos realizados Mikellides et al. (2005), como está mostrado na Figura 5.1(b). Esta distribuição pode ser relacionada com o método intrusivo utilizado, já que no estudo deles o sistema de sonda rápida faz uma medição em curtíssimo espaço de tempo tentando perturbar pouco o plasma. Também, o tipo de inserto pode ser a causa dessa diferença, porque os insertos utilizados nos estudos dos autores mencionados foram de tipo impregnado, e os do LAP são do tipo de folha de tântalo enrolado coberto com mistura de carbonatos.

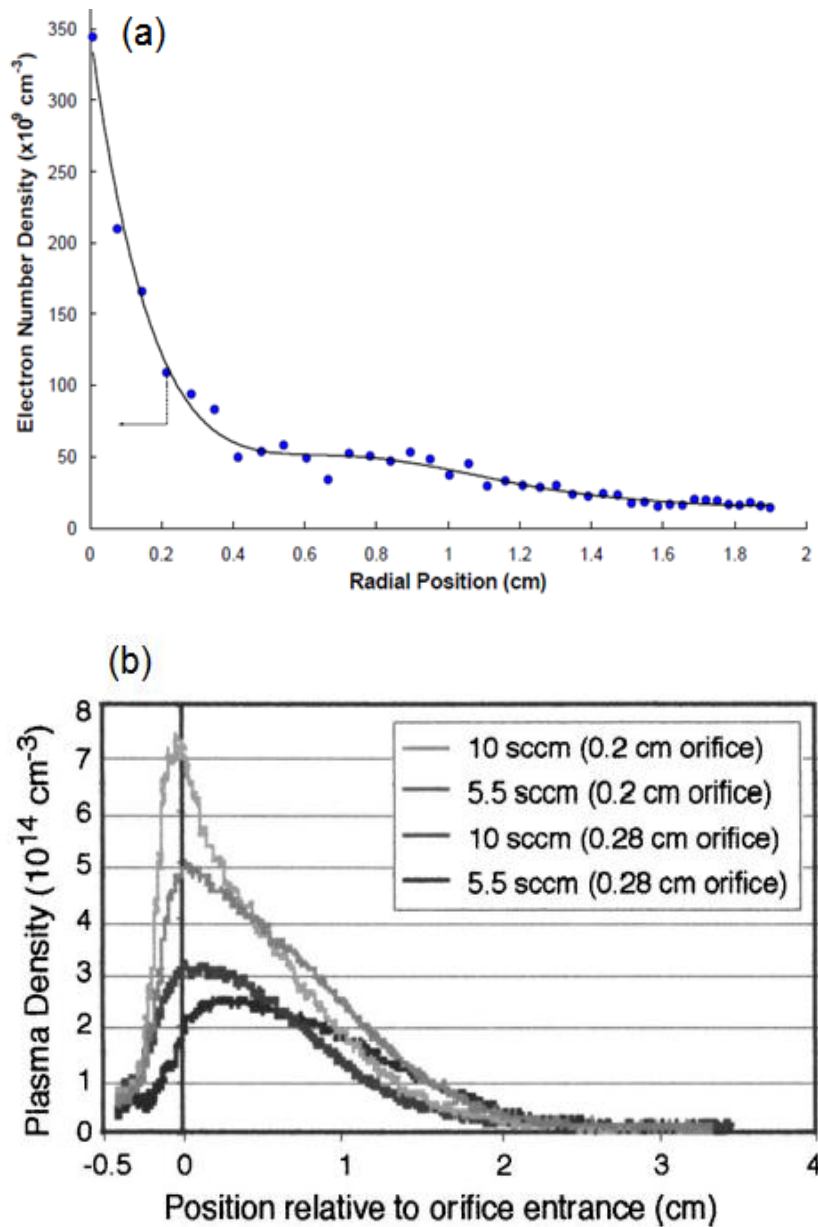


Figura 5.1- Distribuição de densidade de elétron ao longo da distância obtida por sonda rápida nos estudos feitos por Martin e Williams (2009) (a) e estudo feito por Mikellides et al. (2005)(b).
 Fonte: Martin e Williams (2009), Mikellide et al. (2005).

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho de mestrado foram realizados estudos de caracterização de catodos ocos com três diferentes diâmetros de orifício de ponteira (0,5mm, 0,7mm e 1mm). Inicialmente, foi desenvolvido um procedimento para preparação dos catodos, previamente à ignição e que é válido para todos os catodos testados no LAP. Prosseguindo, foi realizada a variação de diferentes parâmetros de descarga com três diferentes circuitos elétricos de corrente de descarga, com gás argônio e xenônio, e nessas circunstâncias os catodos atingiram diferentes modos de descarga. Conforme isso foi analisado o comportamento dos catodos, nas condições mencionadas segundo os perfis das curvas dos parâmetros de plasma.

Os catodos com menor diâmetro de orifício da ponteira do catodo (catodo 5 e 7) conseguiram operar nos três modos de descarga, sendo estes pluma, difusivo e pontual. O catodo 10 operou somente em dois modos, pluma e difusivo. O melhor modo no qual os catodos se mantiveram em uma condição ótima produzindo alta densidade e tendo um plasma estável é o modo pontual. O modo pontual foi associado com baixa tensão de descarga, baixo ruído de descarga e um ponto intenso luminoso observado perto do orifício. O modo pontual ocorre para alta vazão mássica e com alta corrente de descarga no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo, e com baixa vazão mássica e baixa corrente de descarga para o circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com eletrodo de vigia. Particularmente, a maior densidade de plasma se apresenta no circuito elétrico de corrente de descarga de diodo com anodo. O modo pontual apresenta um plasma denso (densidade de elétrons cerca de $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), que ao longo da distância entre o eletrodo de vigia e o anodo é muito estável segundo os perfis da temperatura de elétrons, do potencial flutuante e do potencial de plasma.

O modo pluma é caracterizado por uma descarga ruidosa com elevada tensão e uma pluma brilhante é observada entre o catodo e o anodo. O modo pluma ocorre com baixa vazão mássica e baixa corrente de descarga, para os catodos de menor diâmetro de orifício da ponteira (catodos 5 e 7). Já para o

catodo com maior diâmetro de orifício, catodo 10, o modo pluma se observou com varias vazões mássicas tanto para baixa como para alta corrente de descarga. A maior densidade de plasma, observada no modo pluma, foi obtida no catodo 10 ($\sim 1.93 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), no caso de alta corrente de descarga (11 A), com xenônio. No modo pluma foi observado que, por exemplo, para densidades de elétrons maiores ou iguais a $2,9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, a densidade de elétrons foi maior que a densidade de íons, e para densidades menores a este valor aconteceu o contrario, para qualquer distância entre o eletrodo de vigia e o anodo. Nos casos de menor densidade de plasma o perfil de temperatura de elétrons e potencial de plasma ao longo da distância variou consideravelmente: nos piores casos, próximo ao eletrodo de vigia a temperatura de elétrons permanece na faixa esperada para estes catodos ($\leq 2,5 \text{ eV}$), mas conforme ao se aproximar ao anodo a temperatura de elétrons aumenta a valores muito altos, o que resulta também num aumento do potencial de plasma. A menor densidade de plasma foi observada para os casos em que a tensão de descarga foi muito alta, em comparação ao potencial de plasma. Isto pode estar relacionado aos mecanismos de emissão, nas condições de descarga de situações críticas, já que o plasma pode estar num estado de não equilíbrio térmico e com baixo grau de ionização.

A transição entre o modo pluma e pontual ocorre rapidamente se os parâmetros de operação tais como a vazão mássica e a corrente de descarga são variadas e é acompanhado por histerese. A histerese é um fenômeno não linear, que no caso da mudança de modos se apresentou quando a corrente de descarga foi aumentada e os valores de tensão foram diferentes que quando a corrente de descarga foi diminuída, isso se observou no caso do catodo 5. Nos testes que foram realizados para o catodo 7 e 5 com xenônio, a transições apresentaram um plasma muito denso, similar ao modo pontual.

No modo difusivo, o plasma forma uma luminescência intensa não somente no volume dos eletrodos, mas também em todo o volume interno da câmara de vácuo. Esse modo exhibe alta frequência e grande amplitude de oscilação do plasma, portanto, não foram possíveis medições com sonda. O catodo 10

mostrou mais detalhadamente a transição do modo pluma ao modo difusivo, com gás xenônio.

Os modos pluma e difusivo foram descritos como similares à uma descarga luminescente, enquanto, o modo pontual foi descrito como similar à uma descarga de arco. Na descarga luminescente o plasma é fracamente ionizado e está em um estado de não equilíbrio, enquanto, na descarga de arco o plasma em equilíbrio termodinâmico e de alto grau de ionização, sobretudo em arco térmico.

A configuração geométrica do catodo oco é de grande importância para atingir um modo de operação adequado, por exemplo, isto foi observado ao variar o diâmetro de orifício do eléctrodo de vigia nos teste realizados no catodo 5.

Foi comprovada a capacidade de produção de alta densidade de plasma ($\sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$) dos catodos desenvolvidos no LAP, usando insertos do tipo de folhas de tântalo enrolada coberta com carbonatos.

Durante o estudo foram obtidos bons resultados para aplicação em propulsão iônica, os catodos aqui testados são dispositivos capazes de produzir alta densidade de plasma no modo pontual, transição e pluma. Isto é muito importante em termos de desempenho no propulsor. Mas, ainda são muitos os estudos que podem ser feitos com relação aos regimes de operação nos catodos, e é muito importante dar continuidade a este tipo de estudo, implementando análises teóricas e de simulação numérica, como complemento para entender de forma mais concreta o comportamento dos catodos ocos nos diferentes regimes de descarga.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O estudo de catodos ocos do LAP permitiu as primeiras caracterizações dos catodos desenvolvidos. Mas estudos adicionais são necessários para caracterizá-los completamente. No caso desse trabalho de mestrado foi realizado um estudo totalmente experimental, além disso, é necessário o desenvolvimento da teoria para compreender o observado. Em concordância a isso, sugestões dos trabalhos que podem ser feitos para complementar o trabalho de catodos ocos do LAP são:

- Trabalho de desenvolvimento de teorias que podem explicar os fenômenos físicos que ocorrem nas diferentes regiões do catodo, segundo os regimes nos quais operam.
- Medição da frequência de oscilação dos diferentes regimes de operação.
- Diagnóstico do plasma utilizando o analisador de energia por campo retardador para detalhar a energia dos íons.
- Realização de mais comparações sobre a influência do eletrodo de vigia no catodo, ao ser trocado o diâmetro de orifício da sua ponteira.
- Medições com sonda rápida para comparar com os resultados obtidos nesse trabalho.
- Testes variando a distância do anodo com relação à superfície do eletrodo de vigia, analisando-se a importância desse eletrodo no processo de ignição e de obtenção dos diferentes regimes, e, alternativamente sua geometria.
- Medições da temperatura de plasma dentro e na ponteira do catodo.
- Estudo com diferentes diâmetros internos dos insertos, analisando sua influencia, nos diferentes modos de descarga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIANCONI, M.; CIRRI, G. F.; MATTICARI, G.; SEVERI, A. Design consolidation and space (Pre) qualification of a plasma bridge neutralizer for the RITA 10 Ion Thruster. In: AIDAA / AIAA / DGLR / JSASS 22ND INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 22., 1991, Viareggio, Italy. **Proceedings...** Viareggio: Centropazio, 1992.

BOHM, D. **The characteristics of electrical discharges in magnetic fields.** New York: McGraw-Hill, 1949.

CAPACCI, M.; MINUCCI, M.; SEVERI, A. Simple numerical model describing discharge parameters in orificed hollow cathode devices. In: AIAA / ASME / SAE / ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT, 33., 1997, Seattle, WA. **Proceedings...** Seattle: American Institute of Aeronautics and Astronautics 1997.

CHOUERI, E. Y. Aurora dos foguetes elétricos. **Scientific American Brasil**, n. 82, p. 34-41, 2009.

CIRRI, G. F.; MATTICARI, G.; MINUCCI, M.; NOCI, G.; SEVERI, A.; SVELTO, F. Plasma contactor device based on hollow cathode technology for spacecrafts charging neutralization and tethered system applications: review of italian national program. In: AIAA/AIDAA/DGLR/JSASS INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 23., 1993, Seattle, WA. **Proceedings...** Seattle: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.

DELCROIX, J. L.; TRINDADE, A.R. Hollow cathode arcs. **Adv Electron Electron Phys**, v. 35, p. 87-190, 1974

DOMOKOS, M. T. **Evaluation of low-current orificed hollow cathodes.** Michigan: The University of Michigan, 1999.

DUSHMAN, S. Electron Emission from Metals as a function of temperature. **Journal of American Physical Society**, v. 14, 1923.

FALCE, L. R. **Dispenser cathode technology review**. Semicon Associates, 1979.

FEARN, D.; PHILIP, C. M. An Investigation of physical processes in a hollow cathode discharge. In: AIAA 9th ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 1972, Bethesda, MD. **Proceedings...**Bethesda: AIAA/IEPC, 1972.

FERREIRA, C. M.; DELCROIX, J. L. Theory of the Hollow Cathode Arc. **Journal of Applied Physics**, v. 49, n. 4, p. 2380-2395, 1978.

FORRESTER, A. T. **Large ion beams, vol. 1**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 1988.

FOWLER, R.; NORDHEIM, L. Electron emission in intense electric fields. **Proc. Roy. Soc. Lond. A**, p. 173, 1928.

FRANKLIN, R. N. The plasma-sheath boundary region. **Journal of Physics Applied Physics**, p. 36:R309-R320, 2003. [doi:10.1088/0022-3727/36/22/R01](https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/22/R01).

GOEBEL, D. M.; JAMESON, K. K.; WATKINS, R. M.; KATZ, I.; MIKELLIDES, I. G. Hollow cathode and experiment. I. Plasma characterization using fast miniature scanning probes. **Journal of Applied Physics**, v. 98, p. 9, 2005.

GOEBEL, D. ; KATZ, I. **Fundamentals of electric propulsion, ion and Hall thrusters**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

GONÇALVES, J. A. N.; SANDONATO, G. M.; NETO, C. M. Characterization of a carbonate coating for oxide cathodes. **Vacuum**, v. 49, n. 1, p. 9-15, Jan. 1998. doi: <[10.1016/S0042-207X\(97\)00098-5](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(97)00098-5)

GOLDSTEIN, R.; PAWLIK, E. V.; WEN, L. **Preliminary Investigations of Ion Thruster Cathodes**. Pasadena: JPL Technical Report 32-1536, 1971.

GROH, K. H.; WALTHER, S. E.; LOED, H. W. Recent Neutralizer Investigations at Giessen University. In: AIAA INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION

CONFERENCE, 1976, Key Biscayne, FL. **Proceedings...**Key Biscayne: AIAA/IEPC, 1976.

GRUBISIC, A.; GABRIEL, S. Understanding Hollow Cathode Thrust Production Mechanisms. In: 31st INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 2009, Ann Arbor, Michigan. **Proceedings...** Ann Arbor: IEPC, 2009.

HAN, H. J. **Physical processes in Hollow Cathode discharge**. Monterey, California: Naval postgraduate school, 1989.

HERMAN, D. A.; GALLIMORE, A. D. Near discharge cathode assembly plasma potential measurements in a 30-cm NSTAR- type ion engine amidst beam extraction. **AIAA Journal**, p. 3958, 2004.

HUDSON W. R.; WEIGAND, A. **Hollow cathodes with BaO impregnated porous tungsten inserts and tips**. Cleveland, Ohio: NASA, 1973. TM X-71417.

LANGMUIR, I. The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermoionic current between parallel plane electrodes. **Journal of American Physical Society**, v. 21, p. 419 - 435, 1923.

LIDSKY, L.; ROTHLEDER, J.; ROSE, D.; YOSHIKAWA, S.; MICHELSON C.; MACKIN, J. Highly ionized hollow cathode discharge. **Journal of Applied Physics**, v. 33, p. 2490, 1962. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1729002>.

MANDELL, M. J.; KATZ, I. Theory of Hollow Cathode Operation in Spot and Plume modes. In: 30th AIAA / ASME / SAE / ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE, 1994, Indianapolis. **Proceedings...** Indianapolis: AIAA / ASME / SAE / ASEE, 1994.

MARTIN, R. H.; WILLIAMS, J. **Characterization of hollow cathodes using a fast actuating electrostatic probe**. Colorado: Fort Collins, 2009.

MIKELLIDES, I. G.; KATZ, I.; GOEBEL, D. M.; POLK, J. E. Hollow cathodes theory and experiment. II. A two-dimensional theoretical model of the emitter region. **Journal of Applied Physics**, 2005. DOI: 10.1063/1.2135409.

MIRTICH, M. **Investigation of hollow cathode performance for 30-cm thrusters**. NASA TM X-68298, 1973.

MITCHNER, M.; KRUGER, C. **Partially ionized gases**. Wiley, 1973.

NASSER, E. **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics**. Unite States of America: Jonh Wiley & Sons, Inc, 1971.

OKS, E. **Plasma cathode electron sources**. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.

PARK, Y. C. **Hollow cathode plasma source characteristics**. Monterey, California: Naval postgraduate school, 1989

PEREIRA, G. A. L. **Aplicação de um sistema automatizado de sonda de Langmuir para estudos de plasmas em catodo oco**. São José dos Campos: ITA, 2012.

PESSOA, R. S. **Investigações em plasmas gerados em descarga de catodo oco plano**. São José dos Campos: ITA-CTA, 2005.

PESSOA, R. S.; MACIEL, H. S.; FILHO, G. P.; SOBRINHO, A. S. D. S. **Sonda de Langmuir aquisicao de dados e análise, manual de instrucoes**. São José dos Campos: ITA – Laboratório de Plasmas e Processos. 2007.

POTTINGER, S. **Investigation of steady state characteristics of hollow cathode internal plasmas using optical emission spectroscopy**. Southampton: University of Southampton, 2005.

PREWITT, P. D.; ALLEN, J. E. The Double Sheath Associated with a Hot Cathode. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 348, p. 435-446, 1976.

RAWLIN, V. **A 13,000-hour test of a mercury hollow cathode.** NASA Technical Memorandum X-2785, 1973.

RAWLIN, V. **Operation of the J-series thruster using inert gas.** NASA TM-82977, 1982.

RAWLIN, V.; KERSLAKE, W. Durability of the SERT II Hollow Cathodes and Future Applications of Hollow Cathodes. In: AIAA 7th ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 1969, Williamsburg, VA. **Proceedings...** Williamsburg: AIAA/IEPC, 1969.

REHN, L. A. **Argon hollow cathode.** NASA CR-135102, 1976.

REHN L.; KAUFMAN, H. Correlation of Inert Gas Hollow Cathode Performance. In: AIAA / DGLR 13th INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 1978, San Diego. **Proceedings...** San Diego: AIAA/ DGLR/ IEPC, 1978.

RIEMANN, K. U. The bohm criterion and sheath formation. **Journal of Applied Physics**, v. 24, p. 493-518, 1991.

ROSSETTI, F.; PAGANUCCI, F.; ANDRENUCCI, M. A hollow cathode model for application to the electric propulsion. In: 38th Joint. Propulsion Conference, Indianapolis, 38., 2002, Indianapolis. **Proceedings...** Indianapolis: AIAA, 2002. paper 2002-4239.

RUDWAN, M. A. **Physics of hollow cathode breakdown and steady-state operation with several inert gas propellants.** Southampton: University of Southampton, 2003.

SAKAI, S.; KATAYAMA, T.; AOYAGI, J.; TAKEGAHARA, H. Discharge Modes and Characteristics of Hollow Cathode. In: INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 30., 2007, Florence, Italy. **Proceedings...** Florence: IEPC, 2007.

SALHI, A. **Theoretical and experimental studies of orificed, hollow cathode operation.** Ohio: Ohio State University 1993.

SALHI, A.; TURCHI, P. Scaling Relations for Design and Operation of Orificed Hollow Cathodes. In: 30th AIAA JOINT PROPULSION CONFERENCE, 1994 Indianapolis. **Proceedings...**Indianapolis: AIAA/JPC 1994.

SARVER-VERHEY, T. R. **Destructive evaluation of a xenon hollow cathode after a 28,000 hour life test.** Cleveland: NASA/CR—1998-208678, 1998.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física universitaria con física moderna, Vol. 2 undécima edición.** México: Pearson educación, 2005.

SIEGFRIED, D.; WILBUR, P. **A investigation of mercury hollow cathode phenomena.** San Diego: AIAA, , 1978. Paper No. 78-705.

SIEGFRIED, D.; WILBUR, P. Phenomenological model describing orificed, hollow cathode operation. **AIAA Journal**, v. 21, n. 1, p. 5-6, 1983.

SIEGFRIED, E.; WILBUR, P. A model for mercury orificed hollow cathodes: theory and experiment. **AIAA Journal**, v. 22, n. 10, p. 1405-1412, 1984. doi: 10.2514/3.8796. SIMPSON, H.; WALLACE, N.; FEARN, D.; KELLY, M. A summary of the QinetiQ hollow cathode development programme in support of the European high power Hall effect and gridded thrusters. In: INTERNATIONAL ELECTRIC PROPULSION CONFERENCE, 28., 2003, Toulouse, France. **Proceedings...**Toulouse: IEPC, 2003.

SOULAS, G. C. **Multiple hollow cathode wear testing.** Engineering Services Division. Brook Park, Ohio: NASA Contractor Report 195335, 1994.

SUTTON, G.; BIBLARZ, O. **Rocket propulsion elements.** 7. ed. John Wiley & Son, Inc. , 2001.

TURNER, M. J. L. **Rocket and spacecraft propulsion, principles, practice and new developments.** Chichester, UK: Praxis publishing Ltd., 2005.

WILLIAMS, J.; WILBUR, P. Electron emission from a hollow cathode-based plasma contactor. **Journal of Spacecraft and Rockets**, v. 29, n. 6, Nov.-Dec, p. 820-829, 1992.

APÊNDICE A – DIAGRAMAS DOS TESTES REALIZADOS

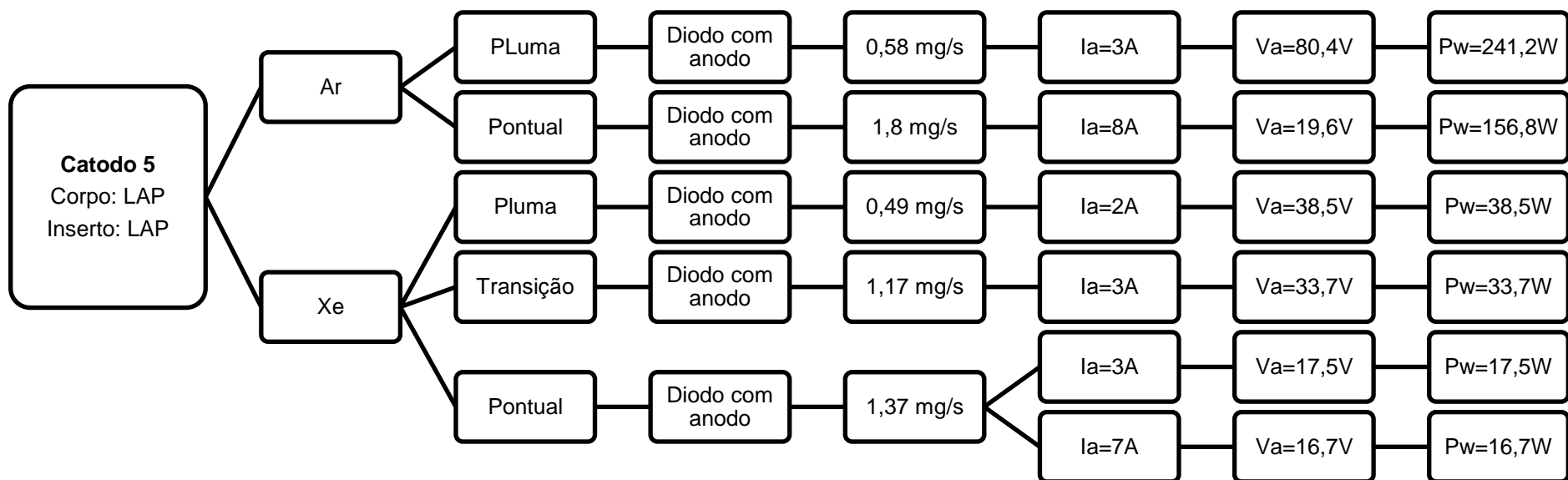


Figura A.1- Esquema dos testes realizados ao catodo 5.

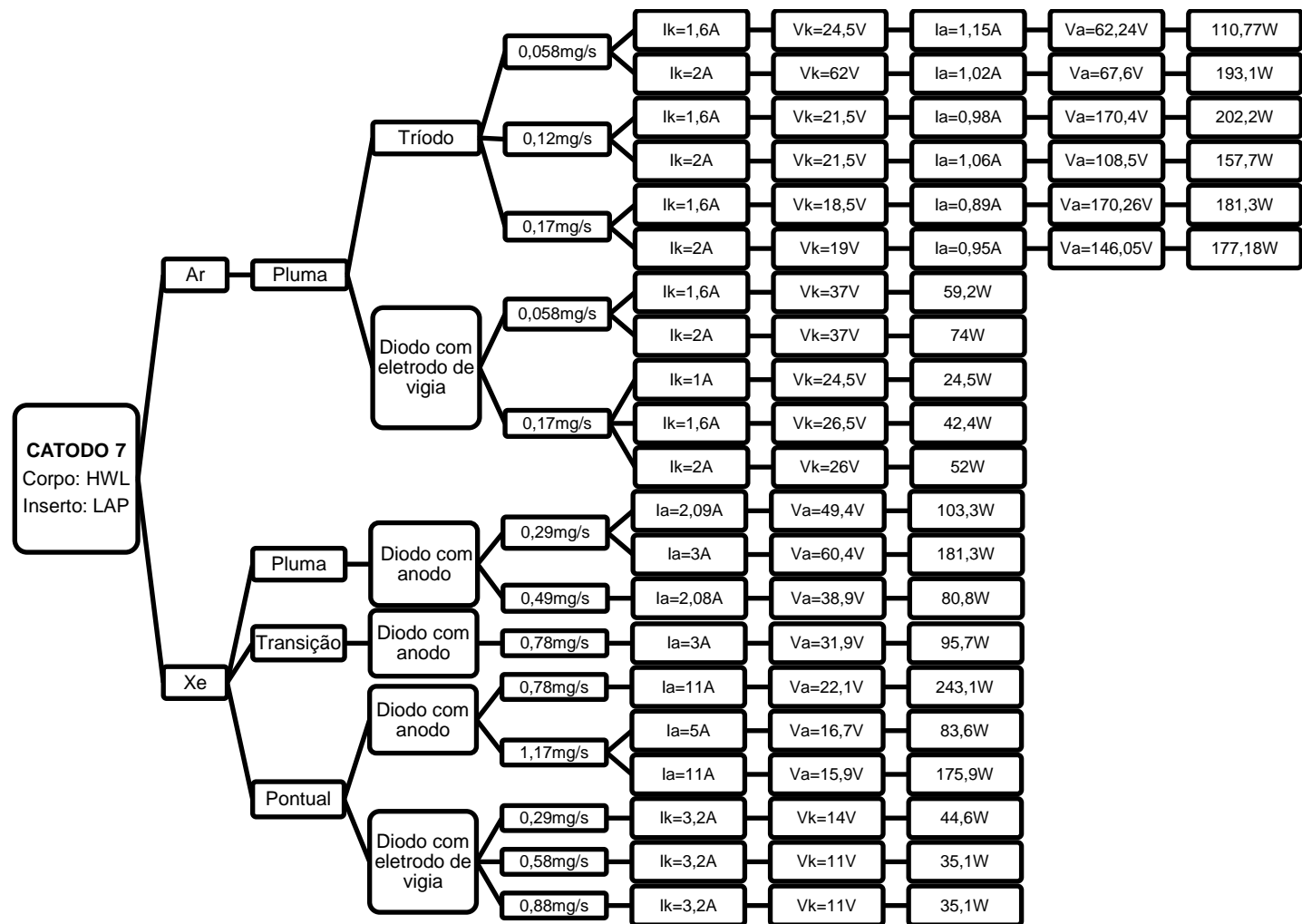


Figura A.2- Esquema dos testes realizados ao catodo 7.

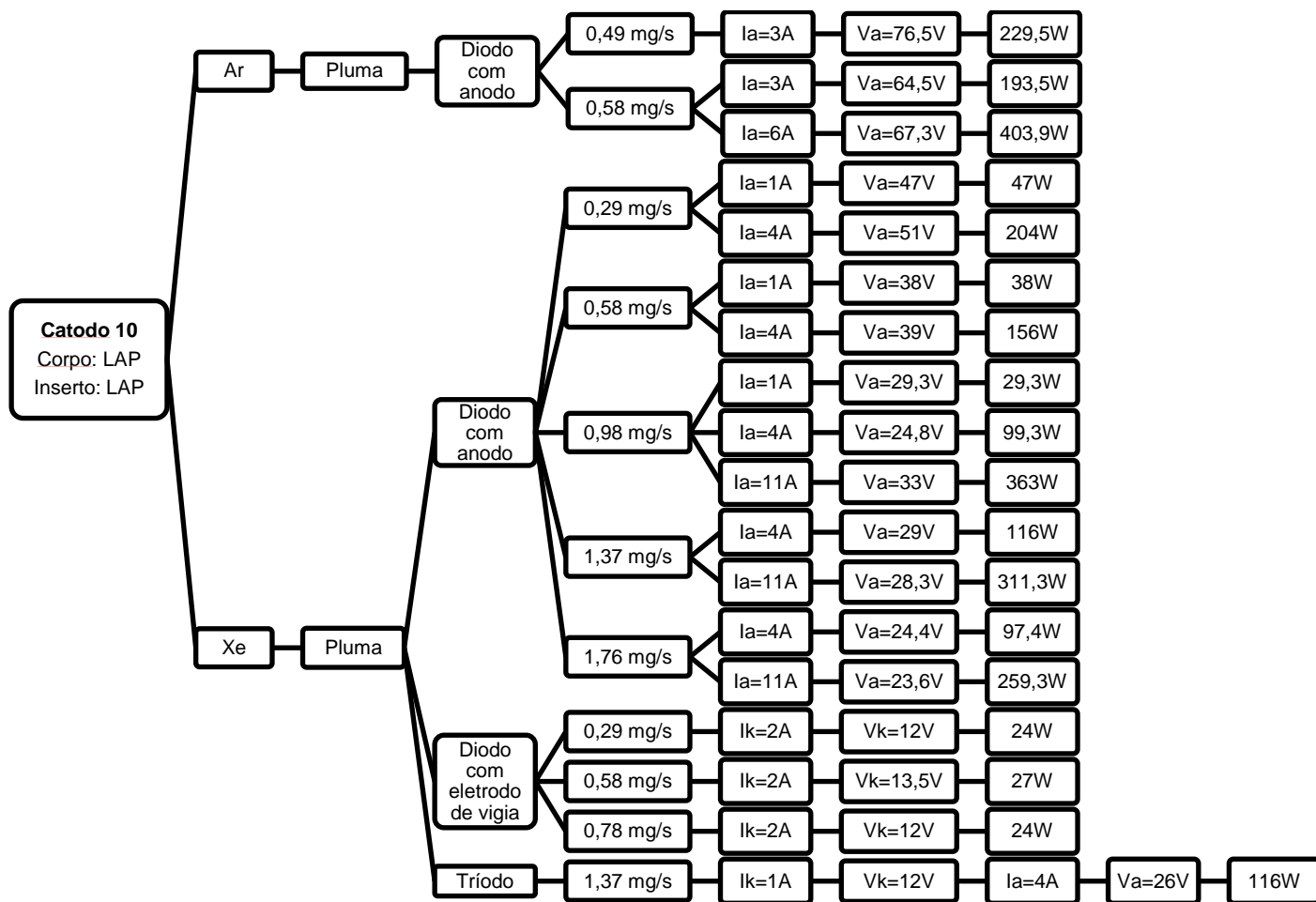


Figura A.3- Esquema dos testes realizados ao catodo 10.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS PARÂMETROS DE PLASMA

Nesse apêndice estão apresentados os gráficos dos parâmetros de plasma com respeito à distância entre superfície do eletrodo de vigia e anodo, as siglas T, DEV e DA correspondem aos circuitos elétricos de corrente de descarga: tríodo, diodo com eletrodo de vigia e diodo com anodo, respectivamente. Também, Ar corresponde a gás argônio e Xe corresponde a gás xenônio.

B.1 Potencial flutuante

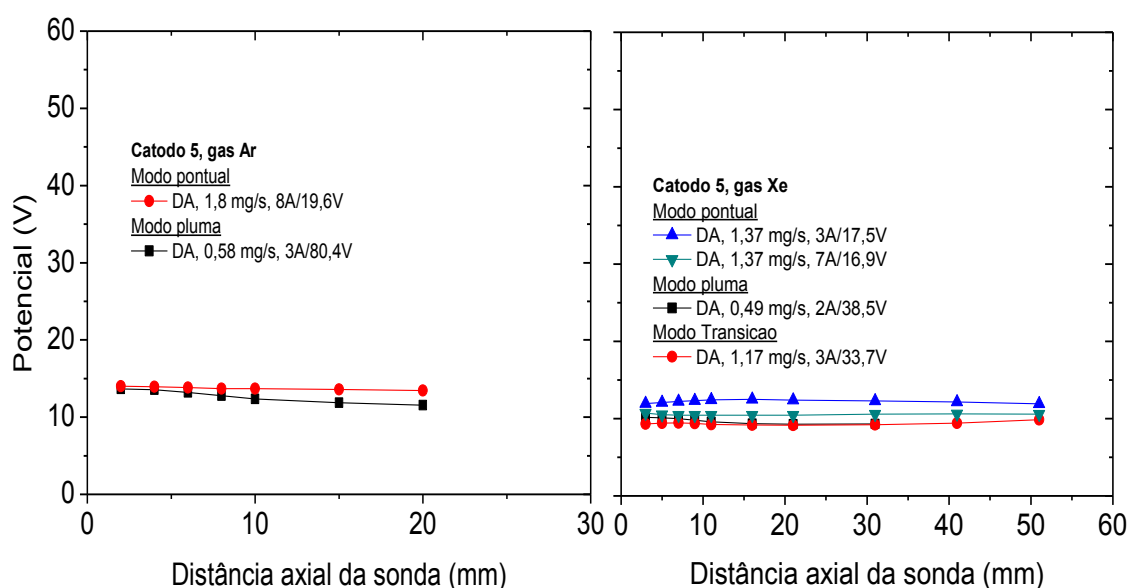


Figura B.1- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

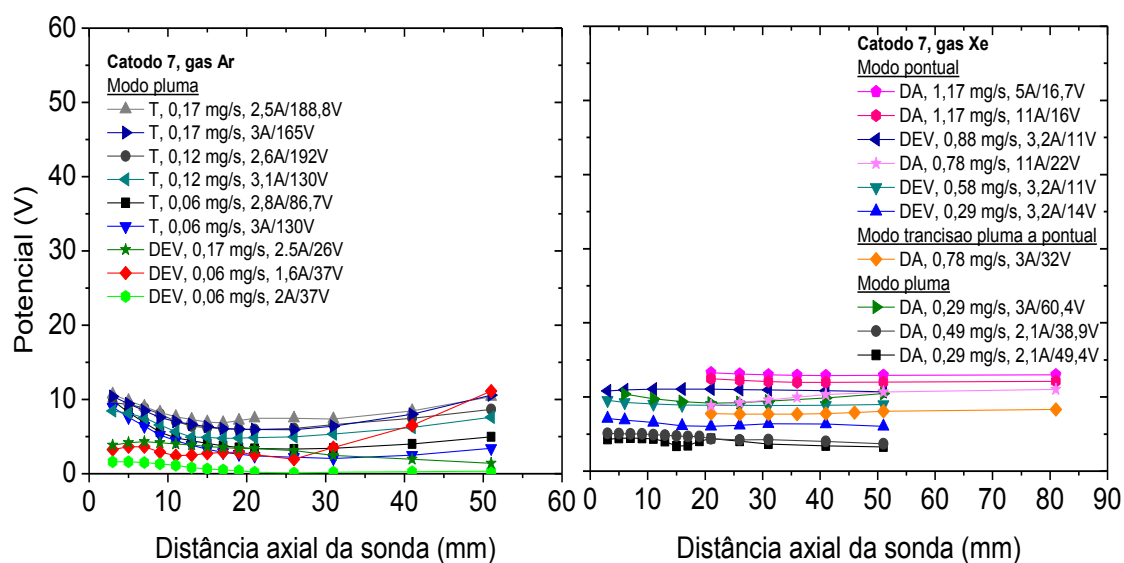


Figura B.2- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

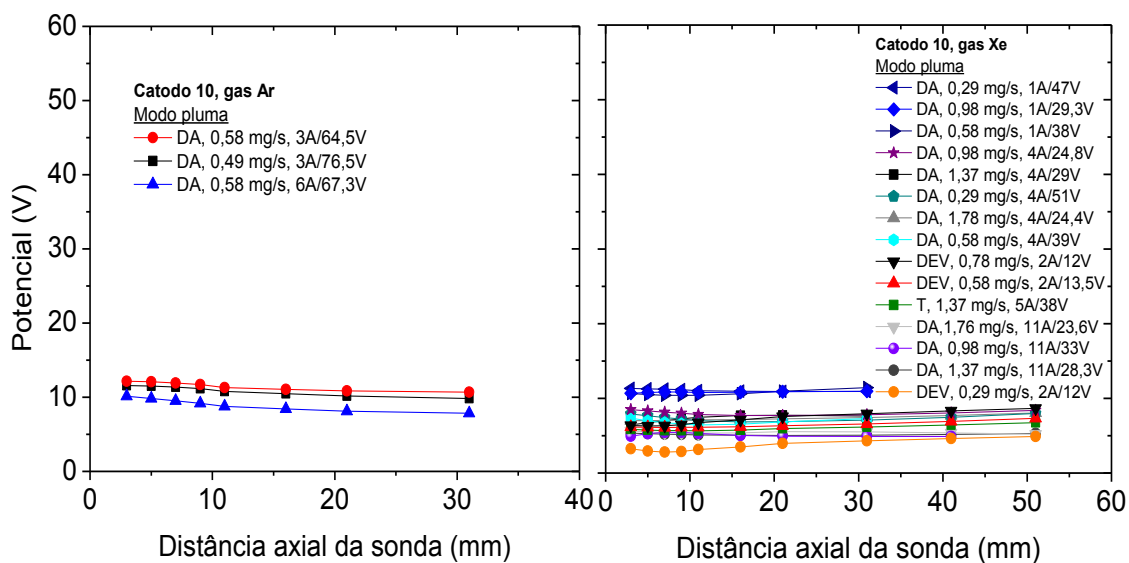


Figura B.3- Potencial flutuante em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.2 Potencial de plasma

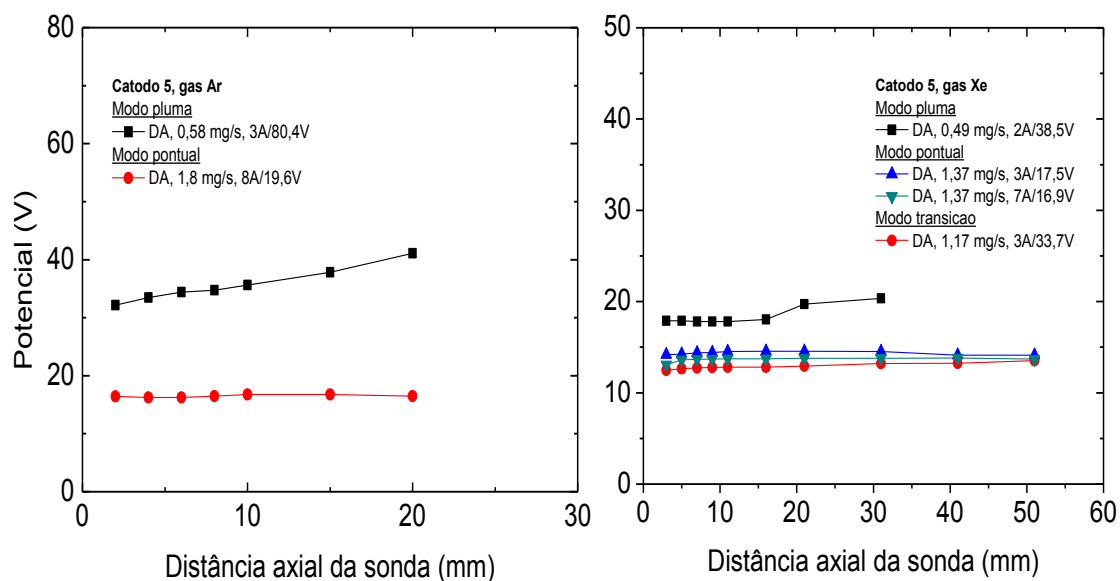


Figura B.4- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

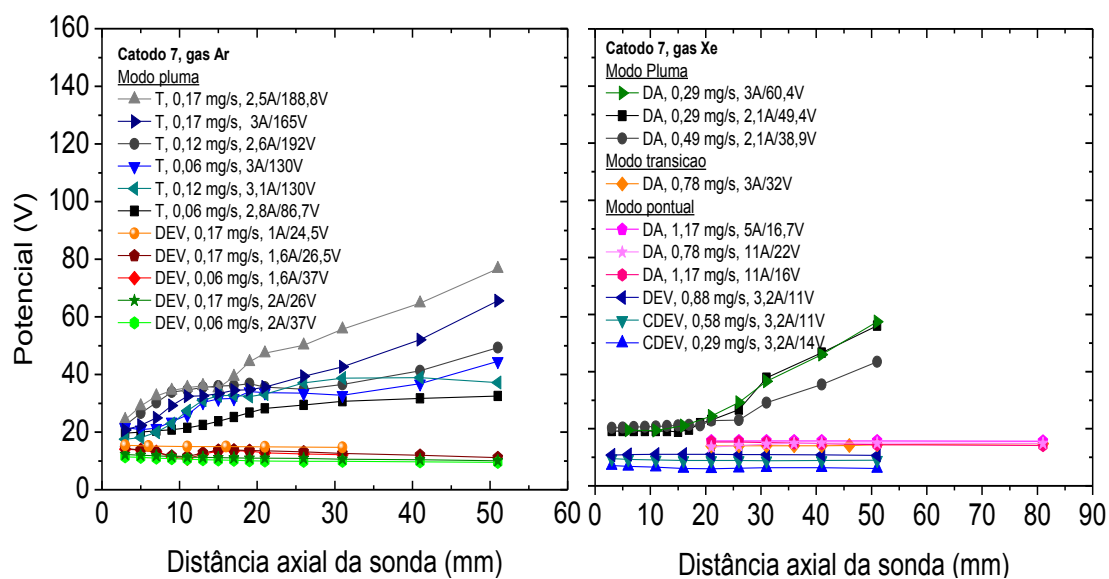


Figura B.5- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

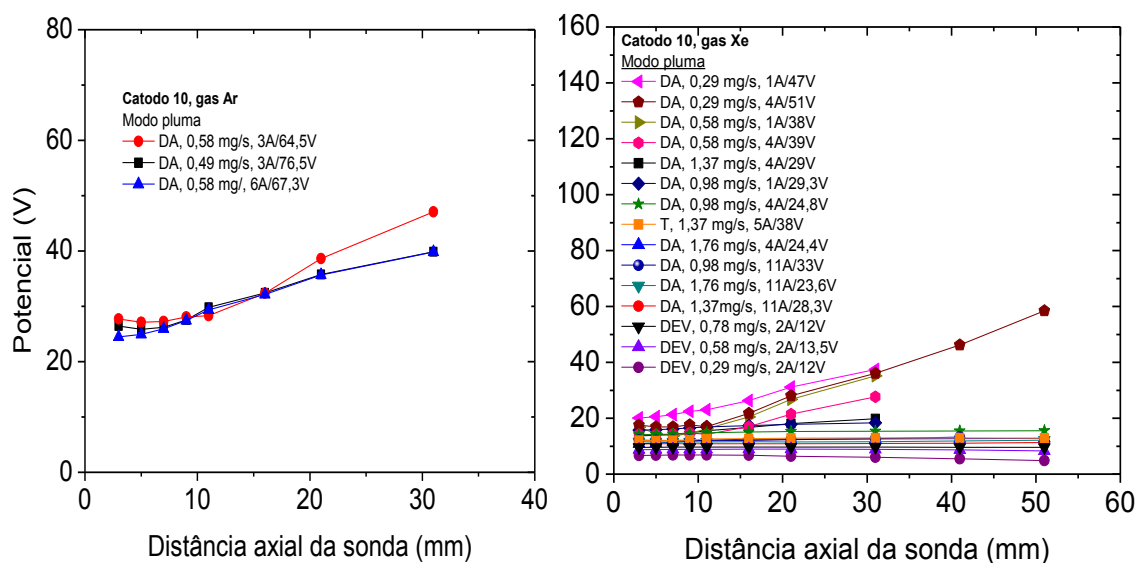


Figura B.6- Potencial de plasma em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.3 Corrente de saturação de elétrons

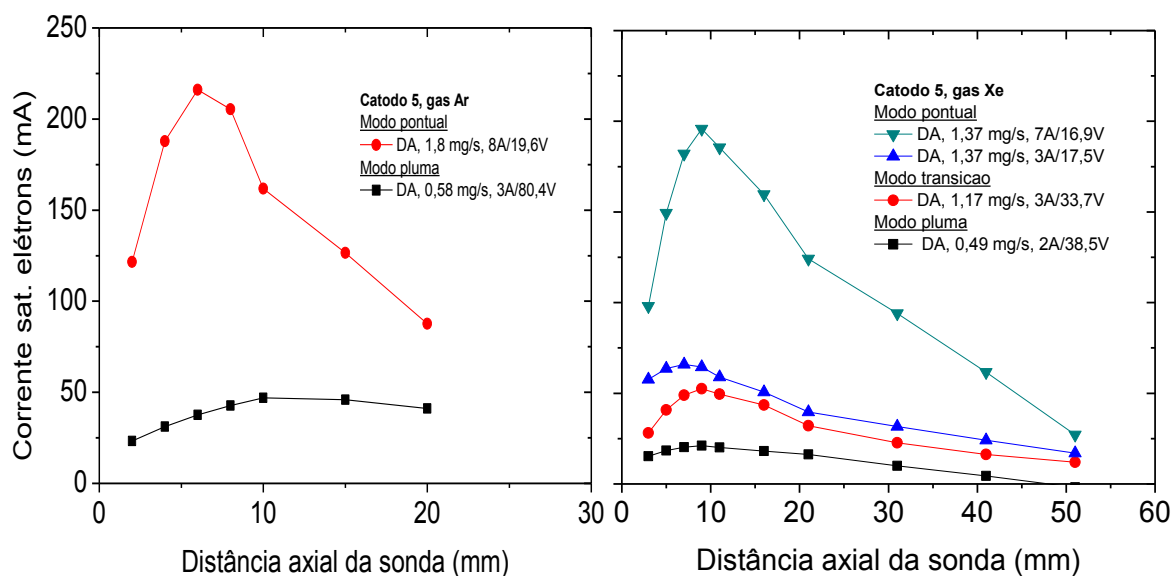


Figura B.7- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

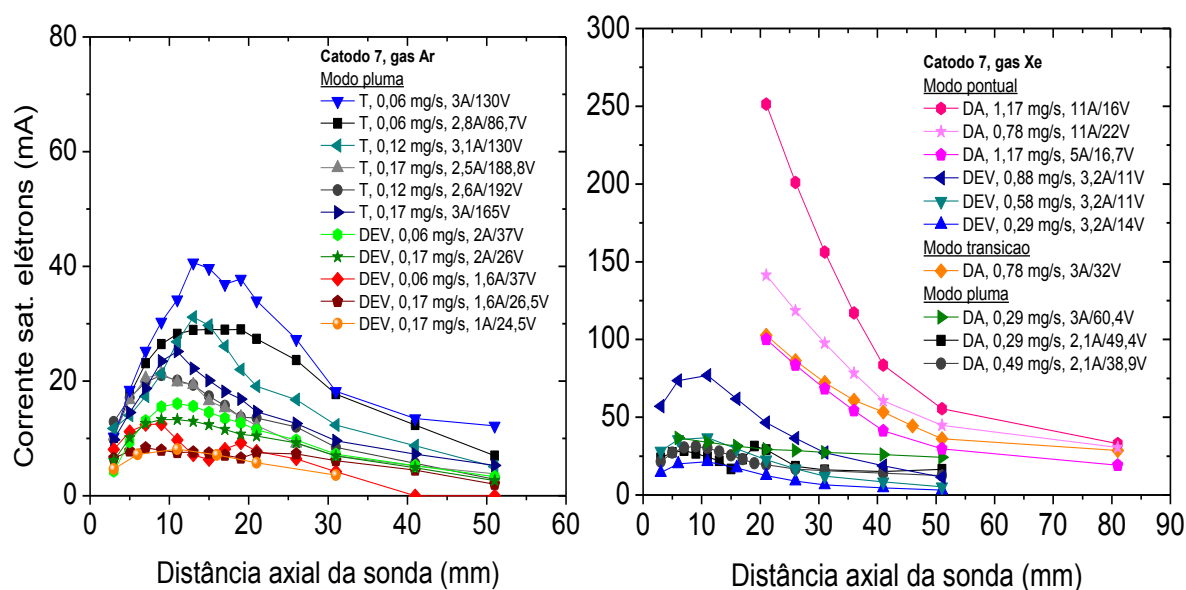


Figura B.8- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

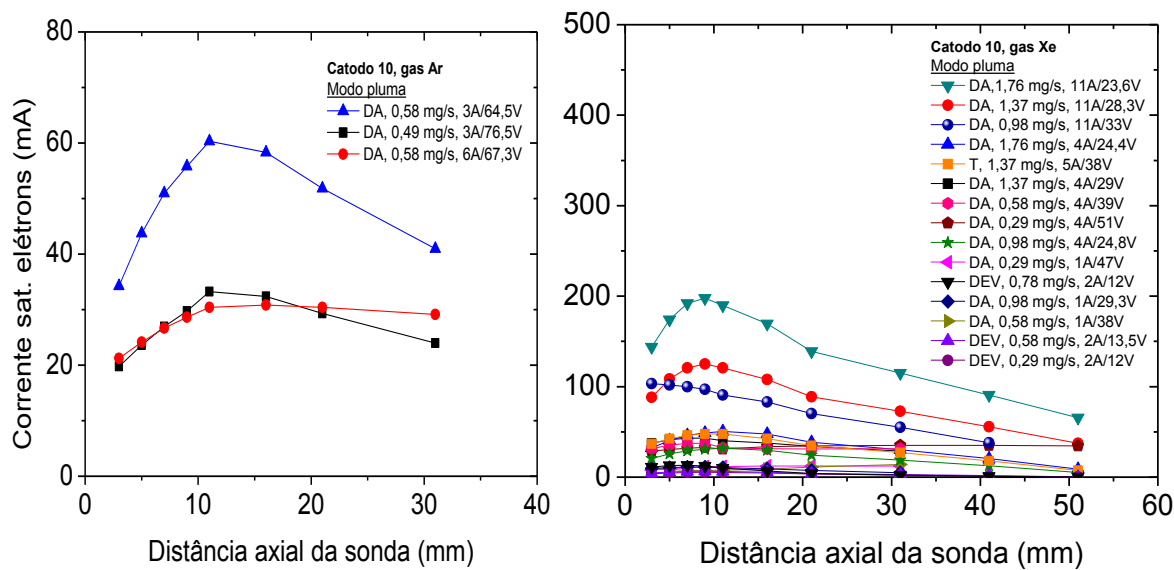


Figura B.9- Corrente de saturação de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.4 Temperatura de elétrons

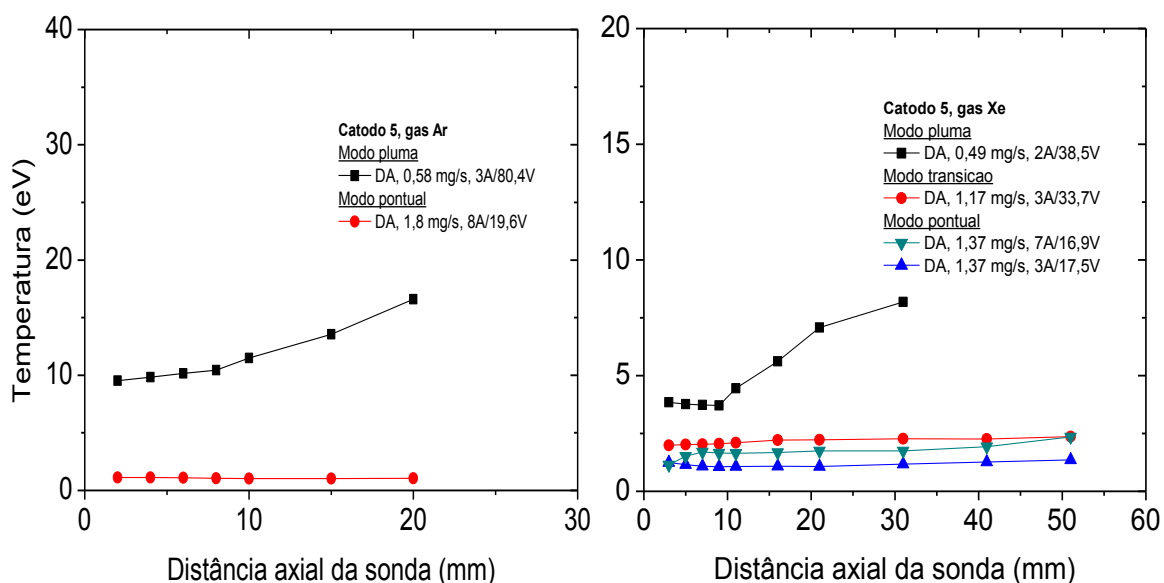


Figura B.10- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

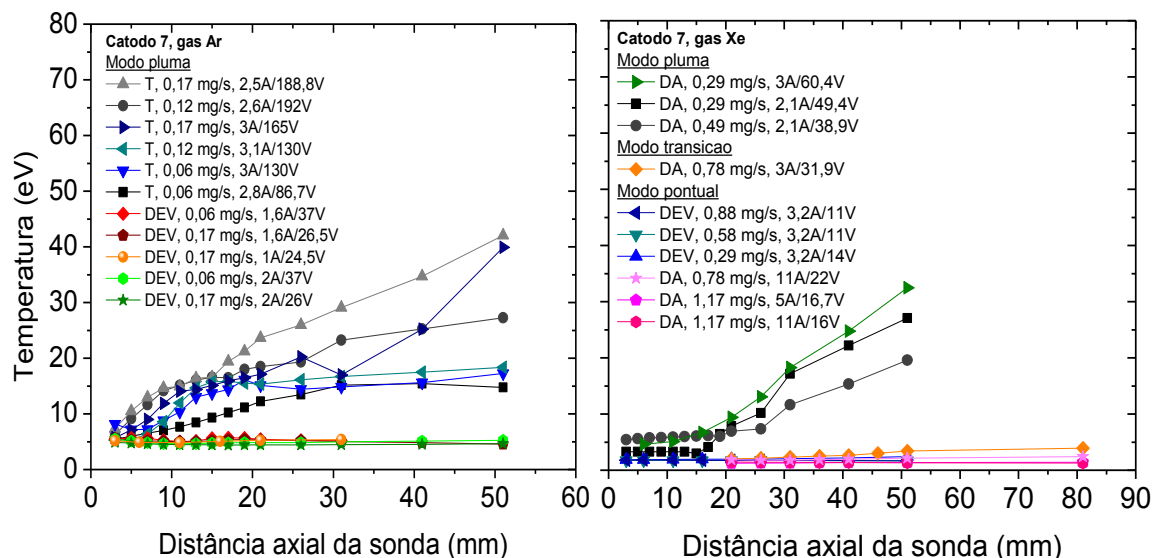


Figura B.11- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

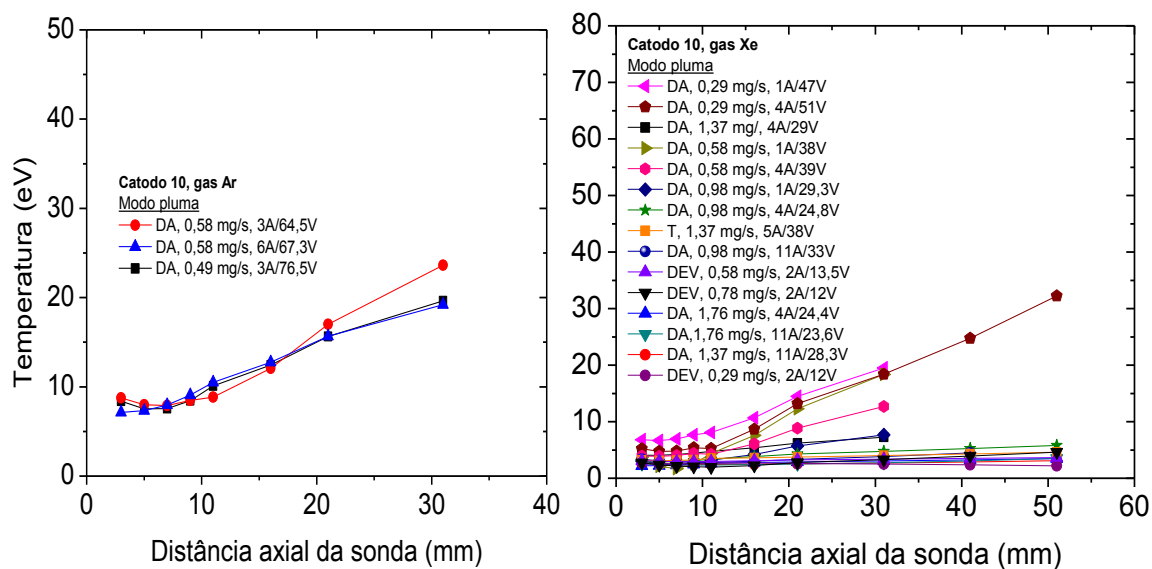


Figura B.12- Temperatura de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.5 Densidade de elétrons

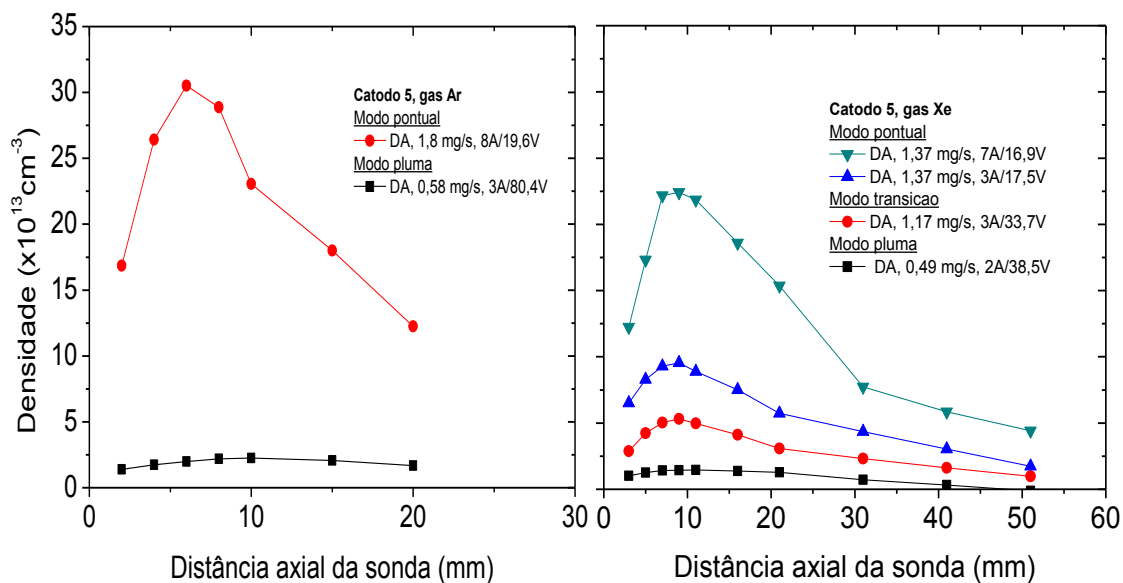


Figura B.13- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

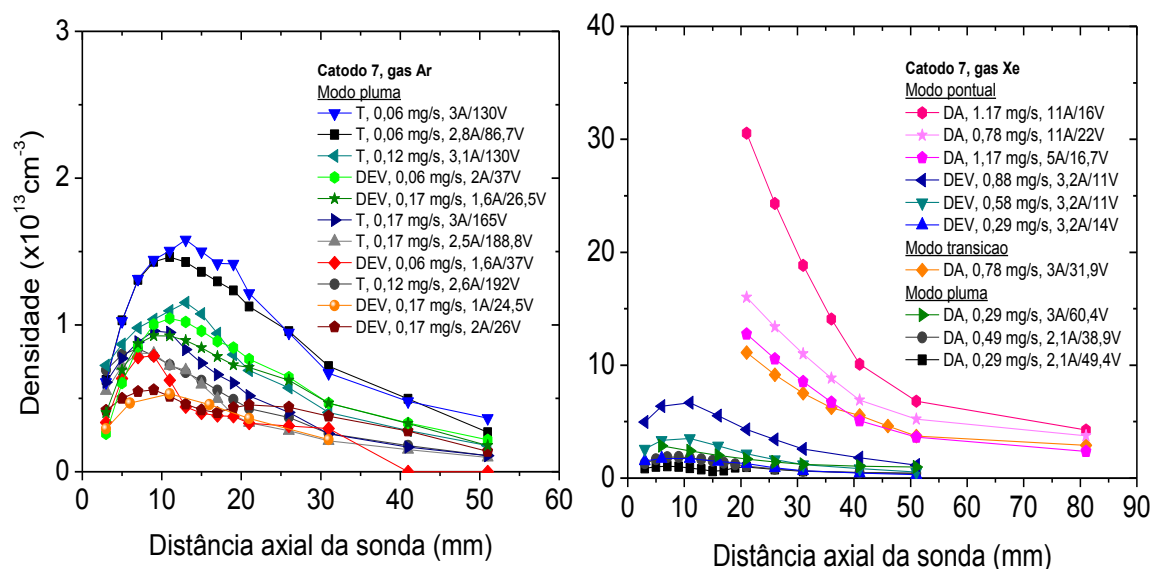


Figura B.14- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

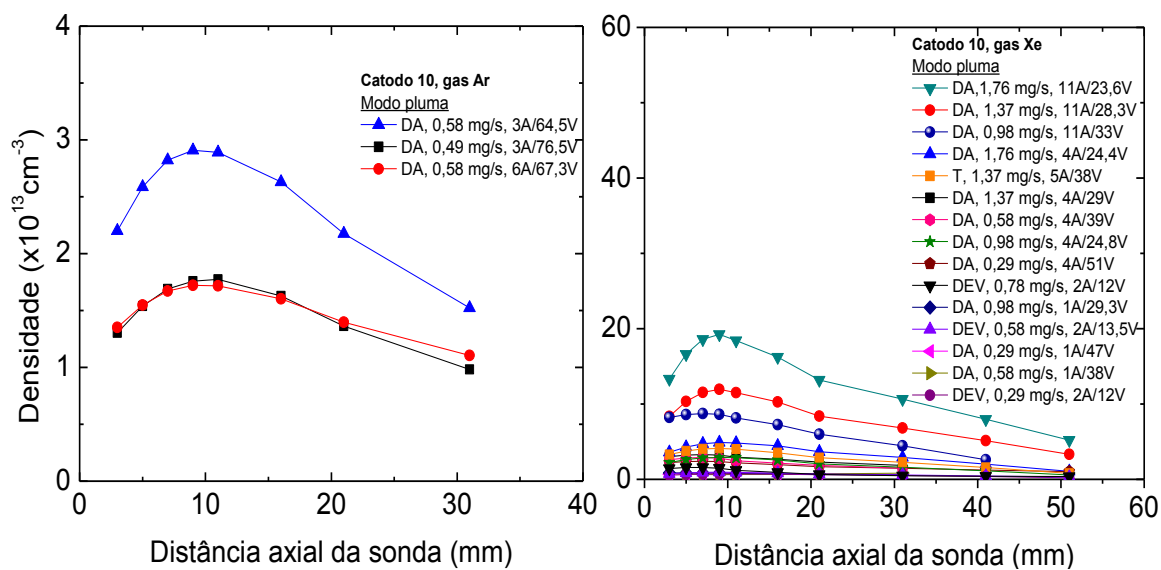


Figura B.15- Densidade de elétrons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.6 Densidade de íons

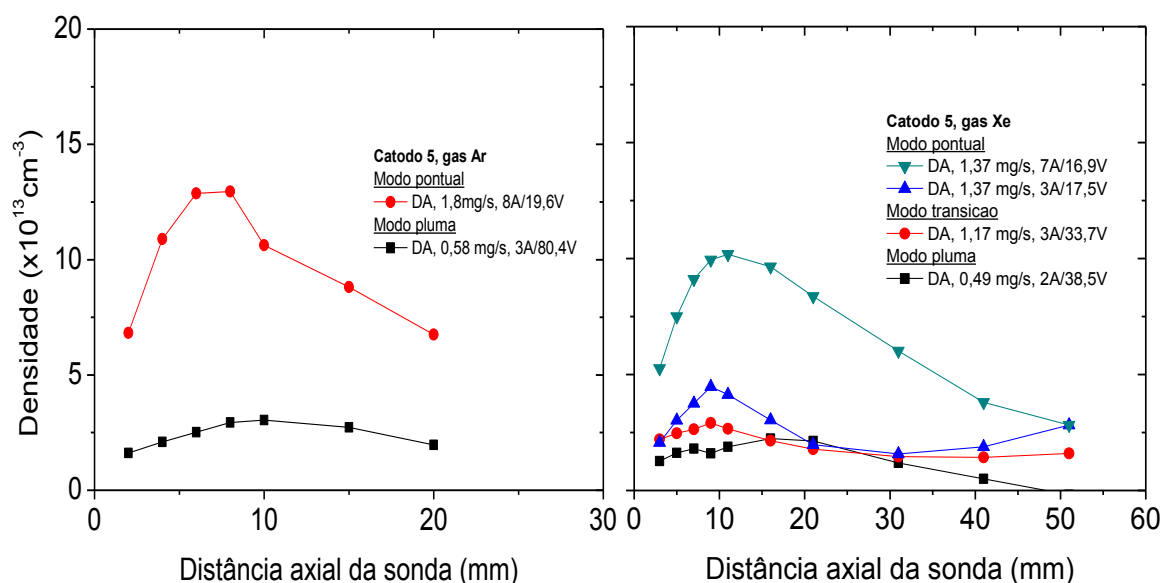


Figura B.16- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

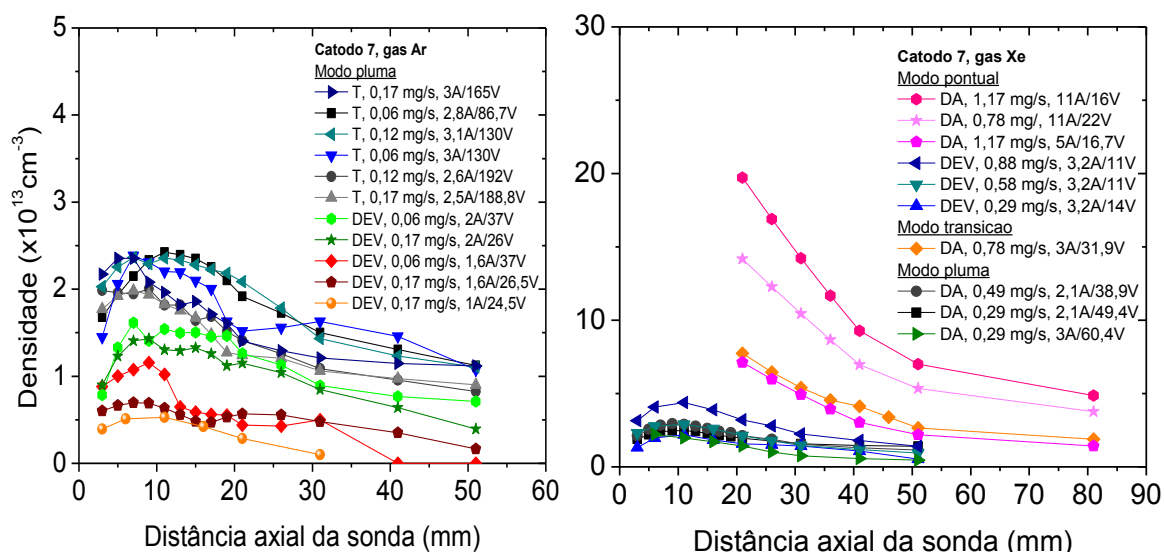


Figura B.17- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

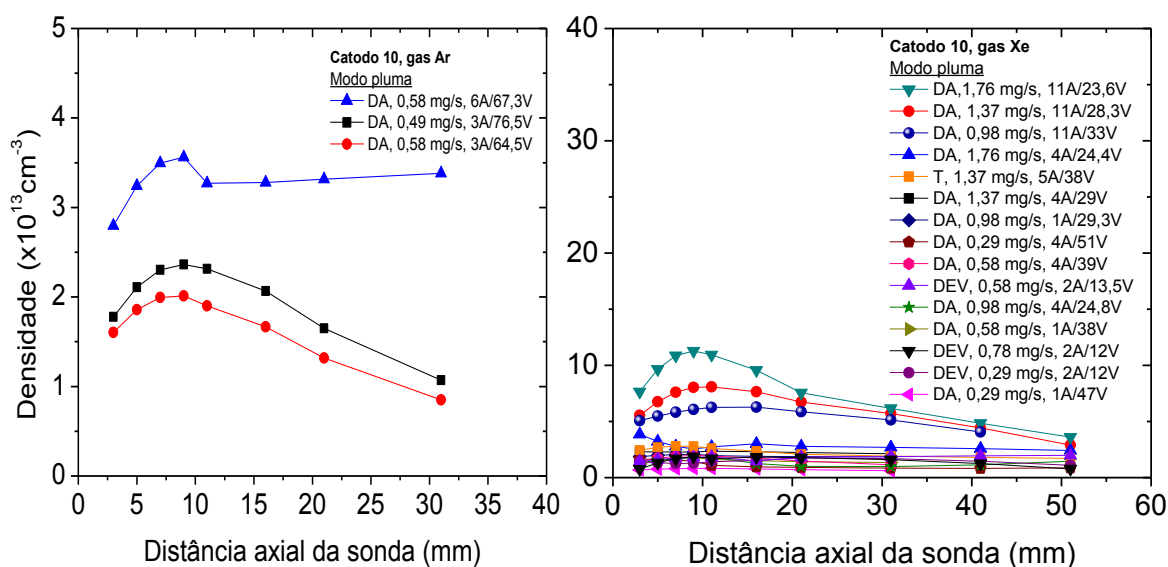


Figura B.18- Densidade de íons em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

B.7 Comprimento debye

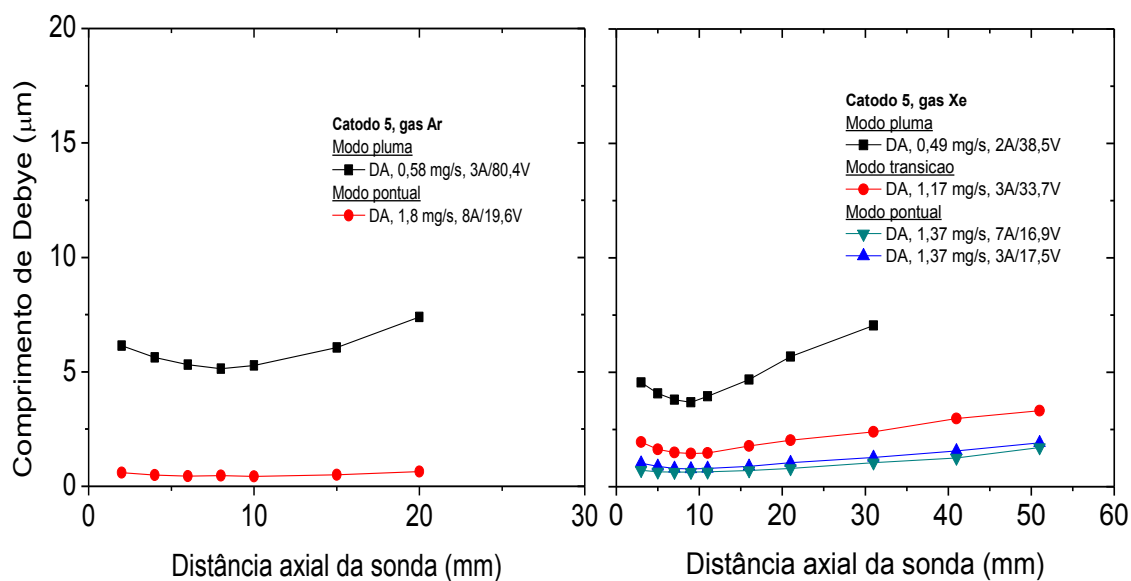


Figura B.19- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 5.

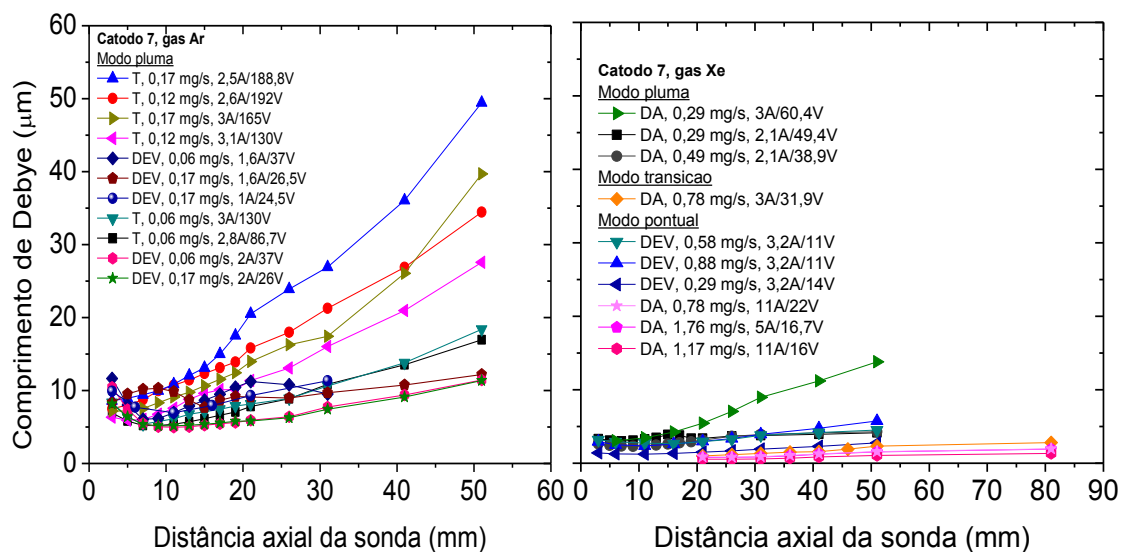


Figura B.20- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 7.

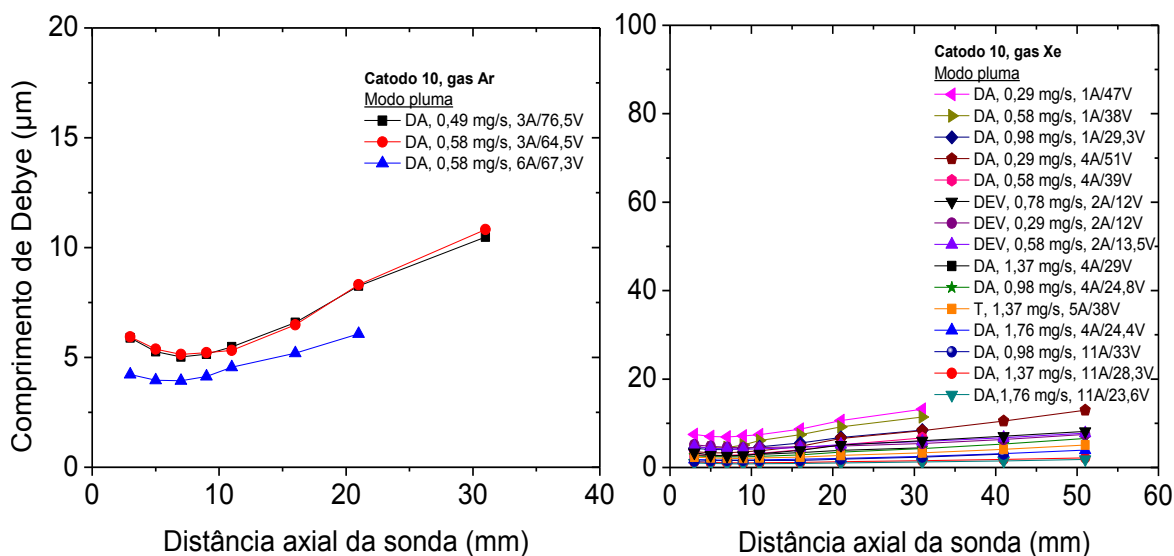


Figura B.21- Comprimento de Debye em função da distância axial da sonda, para testes com xenônio e com argônio, realizados no catodo 10.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.